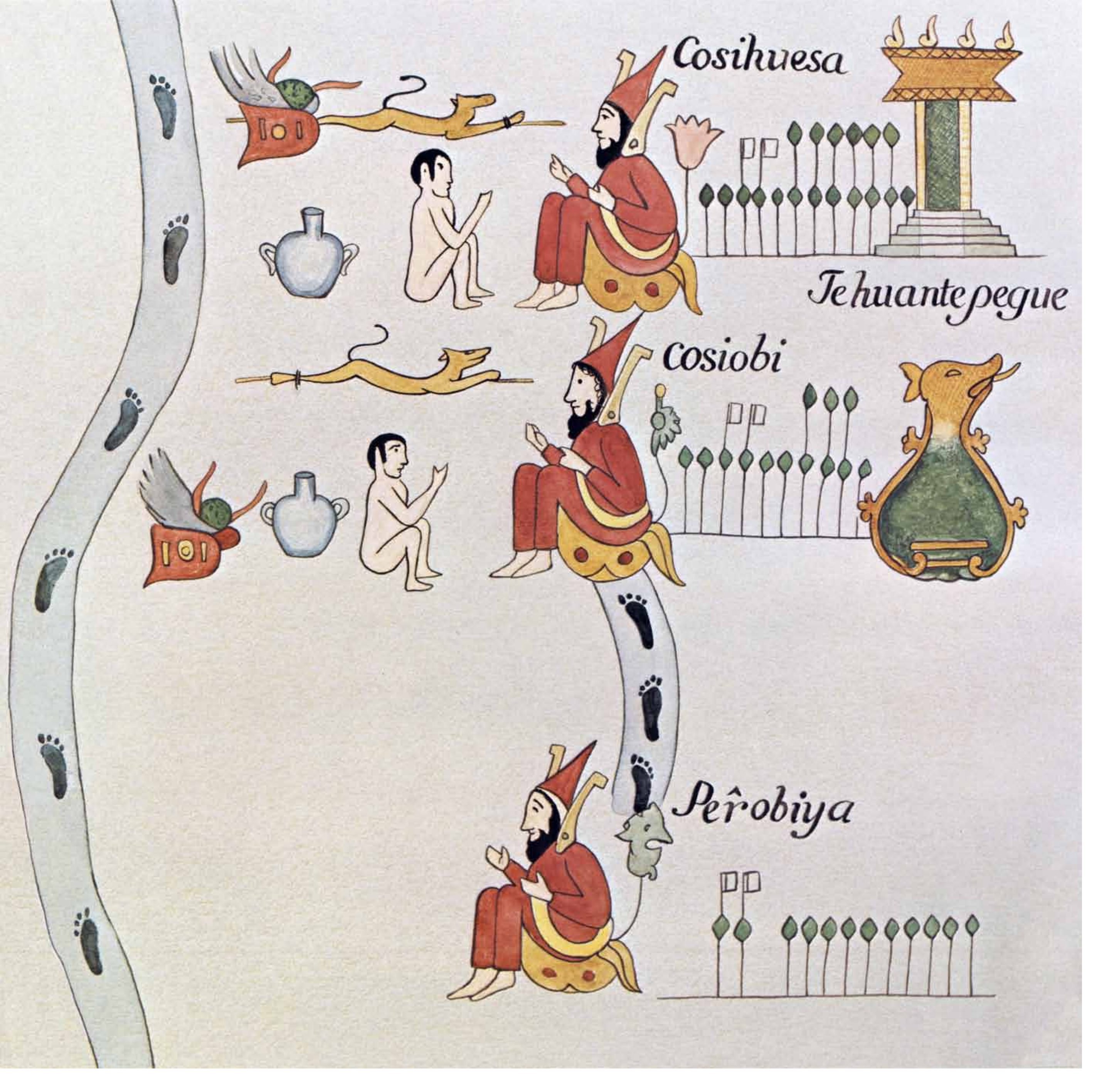
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ESCRITURA ZAPOTECA

Abril 1980

200 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 43
Abril 1980

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR: Francisco Gracia Guillén
REDACCION: José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe), Encarna de Blas (Secretaria de Redacción)
PRODUCCION: César Redondo Zayas
PROMOCION Y PUBLICIDAD: Elena Sánchez-Fabrés
PROMOCION EXTERIOR: Pedro Clotas Cierco
EDITA: Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

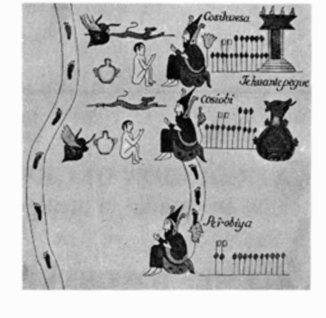
Antonio Castillo: *Atribución del espectro radioeléctrico;* Carlos Oppenheimer: *Elementos genéticos transponibles;* Alfredo Jiménez: *La escritura zapoteca;* Manuel Puigcerver: *Observatorio Einstein de rayos X;* Miquel Gich: *El parque de Yellowstone, ventana al interior de la tierra;* Ramón Fontarnau y Francés E. Lynd: *La percepción del crecimiento humano;* Joandomènec Ros: *Cangrejos decoradores;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Enrique Hermana, Antonio Blanco, Fernando Colmenares y Helena Rivero

Libros:

Jacinto Nadal, Mariá Alemany y Miguel Morey



LA PORTADA

La pintura de la portada reproduce una parte de un documento escrito para las autoridades coloniales españolas de México en 1540. Conocido como el Lienzo de Guevea, el documento definía la genealogía de ciertos gobernantes zapotecas y los límites geográficos de Santiago de Guevea, un pueblo zapoteca en el Istmo de Tehuantepec (*véase la ilustración de la página 29*). En la parte superior, un gobernante zapoteca identificado como Cosihuesa (más apropiadamente Cozijoeza o "Dios del Rayo") se ve recibiendo tributo: un animal atado a un palo para transportar, un bulto conteniendo plumas y otros artículos, un cautivo desnudo y un gran recipiente lleno quizá de pulque. El gobernante que aparece sentado debajo del Dios del Rayo, que recibe un tributo similar, es su hijo Cosiobi (más apropiadamente Cocijopii o "Viento relampagueante"). Detrás de él hay un "signo de cerro", identificado como Tehuantepegue, actual Tehuantepec. La identidad de la tercera figura, que aparece sin tributo, es discutible. Sin embargo, se trata casi con certeza de un miembro de la misma familia real (ver "La escritura zapoteca", pág. 28).

Suscripciones:
Prensa Científica, S.A.
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2200 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 36 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
225 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
340 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239, Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Enid Kotschnig

Página	Fuente
14-22	Ilil Arbel
9-12	Gabor Kiss
17	Stanley N. Cohen, Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford
18	Bunji Tagawa
19	Barbara McClintock, Cold Spring Harbor Laboratory (*arriba*); Bunji Tagawa (*abajo*)
20-25	Bunji Tagawa
29	Enid Kotschnig
30	John Paddock
31-32	Andrew Tomko
33	Mark Orsen
34-35	Patricia J. Wynne
36	Mark Orsen (*izquierda*), Patricia J. Wynne (*derecha*)
37-39	Patricia J. Wynne
40	Patricia J. Wynne (*arriba*), Mark Orsen (*abajo*)
41-42	Mark Orsen
53	High-Energy Astronomical Observatory-2
54	Perkin-Elmer Corporation
55-59	Allen Beechel
60	Harvard College Observatory
61	High-Energy Astronomical Observatory-2
62	High-Energy Astronomical Observatory-2 y Harvard College Observatory
63	High-Energy Astronomical Observatory-2 (*arriba*), Hale Observatories (*abajo*)
64	High-Energy Astronomical Observatory-2 (*izquierda*), Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (*derecha*)
68-69	George V. Kelvin
70	EROS Data Center, National Aeronautics and Space Administration
71-74	George V. Kelvin
75	Robert B. Smith, Universidad de Utah
76-78	George V. Kelvin
81-82	Ignacio Ferrin, Cortesía del Observatorio Lowell
83-88	Ignacio Ferrin
89	Ignacio Ferrin (*arriba*); Cortesía del Centro Nacional de Datos Científicos Espaciales, Centro A de Cohetes y Satélites (*abajo*)
90	Ignacio Ferrin
93-101	Jerome Kuhl
103	Douglas Faulkner
104-108	Tom Prentiss
110-116	Ilil Arbel
118	Michael Goodman
119	Michael Goodman (*arriba*), John Osborne y Bob Waterman (*abajo*)
120	Michael Goodman
121	C. W. McCutchen (*arriba*), Michael Goodman (*abajo*)
122	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guizpúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda
Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

CHARLES LEE JACKSON ("Atribución del espectro radioeléctrico") es un ingeniero en electricidad con un interés especial por los aspectos de la administración pública de la tecnología de comunicaciones. Pertenece a la dirección técnica del Comité de Comunicaciones de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos. Graduado en el Harvard College, se doctoró en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en donde se dedicó a las comunicaciones e investigación operativa, sin olvidar el campo de los ordenadores.

STANLEY N. COHEN y JAMES A. SHAPIRO ("Elementos genéticos transponibles") son genetistas moleculares. Cohen es profesor y presidente del departamento de genética de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. Se formó en la Universidad de Rutgers y en la de Pennsylvania. Desde su ingreso en la Facultad de Stanford, en 1968, su labor se ha centrado en la investigación de plásmidos: segmentos extracromosómicos de ADN que se encuentran en determinadas bacterias. En 1973, junto con sus colegas, demostró que los plásmidos podían utilizarse como moléculas transportadoras de ADN extraño, lo que supuso el primer éxito en los experimentos de trasplante de genes. Shapiro es profesor asociado de microbiología en la Universidad de Chicago. Como estudiante pregraduado se especializó en literatura inglesa en el Harvard College; más tarde marchó a Inglaterra para estudiar genética, doctorándose en esta especialidad por la Universidad de Cambridge en 1968.

JOYCE MARCUS ("La escritura zapoteca") es conservadora adjunta de arqueología latinoamericana en el Museo de Antropología de la Universidad de Michigan. Realizó los estudios de pregraduación en la Universidad de California en Berkeley y los estudios graduados en la Universidad de Harvard, donde recibió el doctorado en antropología en 1974. Pasó un año como Robert Woods Bliss Fellow en Dumbarton Oaks, donde publicó en 1976 su libro *Emblem and State in the Classic Maya Lowlands: An Epigraphic Approach to Territorial Organization.*

RICCARDO GIACCONI ("Observatorio Einstein de Rayos X") enseña astronomía en Harvard, donde desempeña el cargo de director adjunto de la división de astrofísica de altas energías del Centro de Astrofísica. Nació y estudió en Italia, donde obtuvo su doctorado en física por la Universidad de Milán. Fue profesor en Milán hasta 1956, época en que marchó a los Estados Unidos en calidad de científico Fulbright para hacer investigación en la Universidad de Indiana. Antes de aceptar su presente puesto en 1973, Giacconi era vicepresidente ejecutivo de American Science & Engineering, Inc.

ROBERT B. SMITH y ROBERT L. CHRISTIANSEN ("El Parque de Yellowstone, ventana al interior de la tierra") comparten idéntico interés profesional por la región de Yellowstone. Smith da clases de geofísica en la Universidad de Utah. Se graduó y licenció por la Universidad estatal de Utah, doctorándose, en 1967, en la Universidad de Utah. Trabajó, como científico invitado, en el Lamont-Doherty Geological Observatory, de la Universidad de Columbia, en 1969; durante el bienio 1976-1977 fue profesor invitado en el Instituto Federal Suizo de Tecnología. Christiansen ha colaborado en el Servicio Geológico de los Estados Unidos desde 1961, fecha en que obtuvo el doctorado en geología por la Universidad de Stanford. Es especialista en vulcanología, campo al que recientemente ha vuelto a dedicar toda su labor investigadora, tras un período de coordinador del Programa de Investigación Geotérmica del Servicio Geológico.

IGNACIO FERRIN ("Planetas con anillos") enseña astrofísica en la Universidad de los Andes, en la ciudad venezolana de Mérida. Nació en Vigo, España, en 1943, pero emigró a Venezuela a temprana edad, donde reside desde entonces. Estudió física en la Universidad Central de Venezuela, en Caracas. Se graduó en física por la Universidad de Nuevo México en Albuquerque, y doctoró por la de Colorado en Boulder. Dice: "Lo que me motivó a estudiar astrofísica fue mi necesidad de saber qué era el Universo, y dónde estaba yo situado geográficamente dentro de él. Pero ahora que conozco la respuesta a esta pregunta (más o menos, pues ninguna pregunta puede ser respondida en forma absoluta), lo que me obsesiona es algo distinto. El Universo parece estar formado por tres cosas: energía, materia y conciencia. Sobre las dos primeras sabemos algo. Pero ¿qué es la conciencia y cómo se relaciona con la materia y la energía? ¿Cómo se la estudia? ¿Cuáles son sus propiedades? ¡Esta sí que es una pregunta difícil!"

JAMES T. TODD, LEONARD S. MARK, ROBERT E. SHAW y JOHN B. PITTENGER ("La percepción del crecimiento humano") son psicólogos experimentales con un interés común en el papel de la percepción dentro del comportamiento humano. Todd, Mark y Shaw están en la Universidad de Connecticut, Todd y Mark en calidad de investigadores adjuntos y Shaw como profesor de psicología. Todd, que en 1977 se doctoró en psicología experimental por la Universidad de Connectituct, ha trabajado como consultor en programación de ordenadores para el Health Center de la Universidad de Connecticut y el Medical Center de la Universidad de Nueva York; describe su principal tema de investigación como el "modelado matemático de la estimulación óptica que sirve de base a actividades complejas tales como la recogida de pelotas de béisbol o la conducción de un coche". Mark, doctorado también en psicología experimental por Connecticut (1979), escribió su tesis sobre "Un intento transformacional hacia la comprensión de la percepción del crecimiento craneofacial" (el tema del presente artículo). Shaw, el mayor del grupo, se doctoró en psicología por la Universidad Vanderbilt en 1965. Enseñó en la Universidad de Minnesota y en la de Cornell antes de unirse al cuerpo docente de Connecticut en 1976. Pittenger es miembro del departamento de psicología de la Universidad de Arkansas en Little Rock. Se doctoró por la Universidad de Minnesota (1971).

MARY K. WICKSTEN ("Cangrejos decoradores") es colaboradora de investigación en el Crustacea Laboratory de la Allan Hancock Foundation en la Universidad de Southern California. Se graduó en el Humboldt State College y efectuó buena parte de sus estudios sobre los cangrejos decoradores como parte de su tesis doctoral en la Universidad de Southern California, donde se recibió en 1977. Ha trabajado como biólogo marino para el Bureau of Land Management, y ha participado en varios proyectos en el océano frente a California del Sur y en el golfo de Alaska. Según indica Wicksten, su investigación de los cangrejos decoradores "combina los estudios de laboratorio con dos de mis pasatiempos favoritos, la fotografía submarina y el buceo autónomo".

Hace...

José M.ª López Piñero

... trescientos años

Se publicaron las *Disputationes Physiologicae* de Matías García, el representante más destacado de la mentalidad intransigente ante las novedades entre los cultivadores españoles de las ciencias biológicas en las décadas centrales del siglo XVII.

Nacido en la localidad aragonesa de Agreda, Matías García estudió artes y medicina en la Universidad de Valencia. En 1663, ganó la oposición a la cátedra de anatomía de dicha Universidad, que ocupó sin interrupción durante un cuarto de siglo. A lo largo de sus años de magisterio no decayó la práctica de la disección, manteniéndose en este punto la tradición de la escuela anatómica valenciana, instaurada un siglo antes por Pedro Jimeno y Luis Collado. Por el contrario, se amplió el anfiteatro anatómico universitario y se hizo más exigente la reglamentación de las autopsias obligatorias. Al pedir su jubilación en 1687, García alegó su avanzada edad y las enfermedades "ocasionats aixi de asistir a la lectura de dita Cathedra, que es de set a huit hores, com per haver asistit a les anothomies, la qual asistencia es de molt treball y dañosa a la salut". Por dichas razones, se le concedió hasta su muerte, con retención de examinatura, salario y honores.

El principal empeño de la vida de García fue refutar la doctrina de la circulación de la sangre, pero no con argumentos de tipo especulativo, sino con razones extraídas de una práctica personal de autopsias y vivisecciones. Su evolución frente a la obra de William Harvey no puede ser más significativa: "Debido a los abundantes y rigurosos experimentos (realizados por Harvey), permanecí durante largo tiempo admirado e irresoluto, sobre todo porque (Gaspar) Bravo de Sobremonte, el más célebre de los médicos de nuestro tiempo, defendía esta doctrina en sus obras". Más tarde, sin embargo, llegó al convencimiento

564 Disputationes Physiologicae.

Quando impulsus fit causa motuũ contrariorum, & quando non.

natè, sed indifferentèr movens, habet quod in argumento continetur, non verò in nostro casu, vt latè, loco citato, explicatum invenies.

CAP. IV.

An detur circulatio sanguinis.

Cur hic de sãguinis circulatione, dubitemus.

QVia in hac disputatione de facultatibus naturalibus agimus, & septem esse diximus, ad quas, vt diximus, distributiva alimenti, discretiva, dilatativa partium, appositio, agglutinatio, & aliæ superius relatæ, reducuntur, vt omnimode absoluta remaneat hæc, de numero naturalium facultatum, indagatio, meritò an detur sanguinis circulatio dubitamus, nam si daretur, dari erat necesse virtutem sanguinem in circulum moventem, quæ cum non præcedente cognitione, sed sponte à natura fieret, ita & media aliqua naturali facultate in circulum moveretur sanguis; sic & numerum supradictum adaugeret: propterquod indagamus, an detur.

eundem sanguinem transfundi, vt iterum à venis in cor, & à corde in arterias permeet, quem motum circulationem sanguinis nominat, de quo dubitamus, an detur. Et cum à me hæc disputatio latè sit pertractata *tomo I. disputatione de motu sanguinis, quæst. 2.* ideò hic brevitèr eam recapitulabo, lectorem remittens, vt latè eam legat, ad præcitatum locum.

ARTICVLVS I.

Pars affirmativa proponitur.

Auctores sanguinis circulationem defendentes, referuntur.

HAnc defendit Arvæus in suis exercitation. anatom. Harvæum tota Londoniensium Vniversitas patrocinatur. Hanc insequuntur Pecquetus, Riolanus, Iacobus de Back, Coringius, Higmorus, Et ex nostris Bravo, Vallisoletanus, iam Philippi Quarti, nunc Caroli Secundi à cubiculo Medicus, & meritissimus Protomedicus. Fundatur hęc conclusio sequentibus, nam cor dum dilatatur semper novam sanguinis portionem allicit, & cum comprim...

Página de las **Disputationes Physiologicae** *(1680), en la que Matías García inicia la refutación de la doctrina de la circulación de la sangre. Aunque el contenido de su argumentación fuera en gran parte experimental, el estilo del catedrático valenciano continuaba atenido al más estricto molde escolástico*

del "inmenso daño" que tal descubrimiento podía significar para los dogmas galénicos, llegando a compararlo con un veneno casi contagioso que "podía pervertir muchos preceptos médicos verdaderos". Consecuentemente, se consagró a su impugnación, pero atacando a los seguidores de la fisiología moderna en su mismo terreno: "Para manifestar mi opinión en una cuestión tan difícil, realicé numerosas investigaciones anatómicas en anguilas, ranas, palomas y otros animales... La forma en la que expongo la impugnación me ha costado gran trabajo, porque si Harvey se basa principalmente en experiencias anatómicas, yo prometo hacer lo mismo, de modo que sus seguidores no pueden lamentar que su doctrina ha sido rechazada por detalles sin importancia o con razonamientos filosóficos, sino con argumentos basados en vivisecciones". Sin duda, la gran figura del tradicionalismo intransigente español había asimilado inadvertidamente la mentalidad metódica de sus enemigos. Resulta conmovedor ver a un hombre de tal capacidad, que confiesa el gran trabajo, los malos ratos y hasta el dinero que le costó la empresa, situado en un camino tan a contracorriente de la medicina de su tiempo.

El ataque contra la doctrina circulatoria está contenido en *De motu cordis. De motu arteriarum. De motu sanguinis,* el texto más importante de sus *Disputationes Medicinae Selectae* (1677). El volumen incluye también un amplio estudio sobre los venenos y un opúsculo polémico motivado por una disensión terapéutica.

En *Disputationes Physiologicae* de 1680, expuso las doctrinas relativas a los elementos, temperamentos, humores y facultades, de acuerdo con el más ortodoxo galenismo, volviendo a refutar, con cierta extensión, la doctrina circulatoria como un "invento ficticio". En la última "disputatio", ofrece, además, una interesante discusión acerca de la condición intelectual de los sordomudos de nacimiento.

El primer libro de García fue prologado por Juan de Cabriada, catedrático de medicina en Valencia, que había sido su maestro, y padre del médico del mismo nombre que diez años más tarde encabezaría el movimiento renovador español de ruptura con la medicina tradicional.

... cien años

Apareció la *Fisiología general* de Balbino Quesada, quizás el mejor libro sobre la materia publicado en la España del siglo XIX. Se ajusta básicamente a las ideas de Claude Bernard, con un buen conocimiento de las demás contribuciones europeas de la época, incluidas las alemanas. Fue una de las obras más notables entre las procedentes del Instituto Biológico creado en Madrid por Rafael Martínez y Molina, que es el autor del prólogo.

Para situar la contribución de dicho Instituto a la recuperación de los hábitos de trabajo científico en nuestro país, resulta necesario conocer la trayectoria biográfica de Martínez y Molina, representativa de los miembros de las "generaciones intermedias" que lograron superar el profundo colapso que la actividad científica había experimentado en la España de la primera mitad del siglo XIX. Hijo de un modesto barbero sangrador de Jaén, Martínez y Molina cursó dos años de filosofía en la Universidad de Granada, con la intención de seguir la carrera eclesiástica, proyecto que abandonó en 1836. Inició entonces en la misma Granada sus estudios de medicina, que realizó finalmente en el Colegio de San Carlos de Madrid desde 1838 a 1845. Muy pronto consiguió gran prestigio, consiguiendo mantenerse a base de dar clases particulares de anatomía. Simultáneamente, cursó estudios de química, mineralogía, botánica y zoología en el Museo de Ciencias Naturales y en el Jardín Botánico de Madrid, obteniendo el título de doctor en ciencias naturales en 1853, siete años después de haber conseguido el doctorado en medicina y cirugía. En el Colegio de San Carlos, convertido ya en Facultad de Medicina de la Universidad de Madrid, fue primero catedrático sustituto (1854) y luego supernumerario (1857) de anatomía. Durante los años centrales de la centuria, recibió allí la influencia de entusiastas de los estudios morfológicos como Juan Fourquet y Pedro González de Velasco. Aunque su biografía fue muy semejante a la de este último, no fundó una ambiciosa institución científica como el Museo Antropológico de Velasco. Se limitó a montar en su domicilio el citado Instituto Biológico, destinado en principio a complementar la limitada enseñanza médica oficial. Los saneados ingresos procedentes de su actividad profesional como cirujano le permitieron dotarlo de una magnífica biblioteca y de laboratorios de micrografía y de química. No resulta extraño que desbordara su propósito original, convirtiéndose, a partir de 1868, en un activo núcleo de cultivadores de los métodos experimentales aplicados a la medicina y a las ciencias biológicas.

El propio Martínez Molina se interesó, sobre todo, por la histología nor-

mal y patológica. En 1856 publicó el estudio micrográfico de un cáncer de mama operado por Fourquet, uno de los más tempranos trabajos de este tipo salidos del ambiente médico madrileño. También tradujo y presentó (1863) la segunda edición del excelente manual de anatomía microscópica de Etienne Michel Van Kempen, antiguo discípulo de Theodor Schwann. Desde el punto de vista doctrinal, era partidario de las teorías histológicas de Charles Robin, que defendió frente a las de Rudolf Virchow en una revisión de los saberes morfológicos (1867), en la que también se ocupó ampliamente de cuestiones relacionadas con la histopatología, la embriología y la anatomía comparada.

La antropología física fue otra de las disciplinas cultivadas por Martínez Molina. Le dedicó su tesis doctoral en ciencias naturales (1853) y un discurso inaugural de curso de la Universidad de Madrid (1878), en el que defendió las tesis espiritualistas frente al darwinismo. Publicó asimismo trabajos sobre diferentes problemas médicos, entre ellos, varios estudios teratológicos, memorias sobre aguas mineromedicinales y una temprana reflexión en torno al especialismo (1863). Además del manual de Van Kempen, ya citado, tradujo el tratado de anatomía descriptiva de M. F. Constant Sappey (1874) y los de cirugía de Alphonse F. M. Guerin (1875) y Auguste Nélaton (1876).

TRATADO ELEMENTAL

DE

FISIOLOGÍA GENERAL

POR

D. BALBINO QUESADA

DOCTOR EN MEDICINA Y CIRUJÍA
DIRECTOR DE LOS BAÑOS DE CESTONA EN PROPIEDAD Y POR OPOSICION,
EX-PROFESOR DE FISIOLOGÍA EN LA FACULTAD DE MEDICINA
DE GRANADA

PRECEDIDO DE UN PRÓLOGO

POR

EL EXCMO. SR. D. RAFAEL MARTINEZ Y MOLINA

Catedrático de la Universidad Central



MADRID

ESTABLECIMIENTO TIPOGRÁFICO DE EDUARDO CUESTA

Calle de la Cava-alta, núm. 5

1880

Portada de la **Fisiología general** *(1880) de Balbino Quesada, que prologó Rafael Martínez y Molina*

Atribución del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico entre 10 kilohertz y 300 gigahertz es un recurso natural de las comunicaciones y su atribución debe efectuarse de forma correcta. El sistema de atribución se encuentra sujeto a continua revisión

Charles Lee Jackson

Es obvio que las comunicaciones radioeléctricas, tanto nacionales como internacionales, acabarían en un caos sin un sistema para atribuir el número finito de lugares en el espectro radioeléctrico entre los muchos solicitantes. No está claro que los sistemas actualmente en vigor sean los mejores posibles o que funcionen de la forma más eficiente posible. Mi objetivo en este artículo es describir cómo se gestiona comúnmente el espectro (tomando como ejemplo fundamental el sistema vigente en Estados Unidos) y destacar las reformas fundamentales que están hoy bajo estudio.

La parte del espectro electromagnético que se considera como el espectro radioeléctrico (el término radioeléctrico engloba todas las formas de comunicaciones sin hilos, incluyendo televisión, todo tipo de radiodifusión, llamadas telefónicas transmitidas por radioenlaces de microondas, etcétera) puede describirse en términos de frecuencia o de longitud de onda. Se extiende desde muy bajas frecuencias, unos pocos kilohertz (miles de ciclos por segundo) y longitudes de onda de varios kilómetros hasta 300 gigahertz (miles de millones de ciclos por segundo), donde las microondas radioeléctricas se solapan con el infrarrojo lejano. La parte del espectro oficialmente atribuida se extiende desde 10 kilohertz (longitud de onda de 30 kilómetros) hasta 300 gigahertz (longitud de onda, un milímetro) y está densamente poblada por servicios de comunicación de todo tipo.

La frecuencia no es el único componente de los recursos espectrales. La ubicación geográfica introduce también diferencias. Una frecuencia dada puede asignarse en diferentes lugares si están suficientemente alejados. Por ejemplo, en Estados Unidos el canal 4 se utiliza en las estaciones de televisión de Boston, Nueva York, Washington y de otras cincuenta comunidades. La necesaria separación se determina mediante las características de propagación de las ondas radioeléctricas a una determinada frecuencia y el diseño del sistema de comunicaciones.

El principal organismo internacional constituido para atribuir los lugares en el espectro y promulgar recomendaciones técnicas es la Unión Internacional de Telecomunicaciones, comúnmente conocida como UIT, que es una agencia especializada de las Naciones Unidas. En Estados Unidos, la responsabilidad de la gestión del espectro la comparten el Presidente, en cuyo nombre la National Telecommunications and Information Agency del Departamento de Comercio controla la parte del espectro asignada a las agencias del Gobierno Federal, y la Federal Communications Commission (FCC), que supervisa a los restantes usuarios. La jurisdicción de la FCC no sólo cubre las cadenas comerciales de televisión y las emisoras de radio, sino también las actividades en materia de radiocomunicaciones móviles, tanto estatales como municipales, los sistemas radioeléctricos para telefonía, los equipos de radio en banda ciudadana e incluso los pequeños mandos a distancia por radio para abrir y cerrar las puertas de los garajes.

Aunque el objetivo de este artículo es la atribución del espectro, el lector debe recordar que la política nacional e internacional en materia de gestión del espectro se ocupa también de otros asuntos, y está presente en la estructura del sistema de las comunicaciones de masas de una nación. En muchos países incluye el problema de cómo dirigir el diseño de importantes sistemas de comunicación con un gran número de usuarios. También se ocupa del problema de cómo distribuir los beneficios de los recursos públicos y de cómo compaginar alternativas tan conflictivas como la expansión de los servicios de radiodifusión y la mejora de las comunicaciones entre las brigadas de reparación de las compañías de distribución de energía eléctrica. Trataré tales aspectos como subproblemas particulares de la atribución; sin embargo, el tema de la política relativa al espectro podría discutirse tomando como centro cualquiera de ellos.

Para entender las políticas de atribución del espectro, se debe entender cómo se utiliza el espectro. Su empleo viene gobernado por la física de la propagación radioeléctrica y por las limitaciones prácticas de la ingeniería de comunicaciones. El funcionamiento de una estación de radio típica de amplitud modulada (AM), la WNBC en Nueva York, ilustra un enlace sencillo de radiocomunicación.

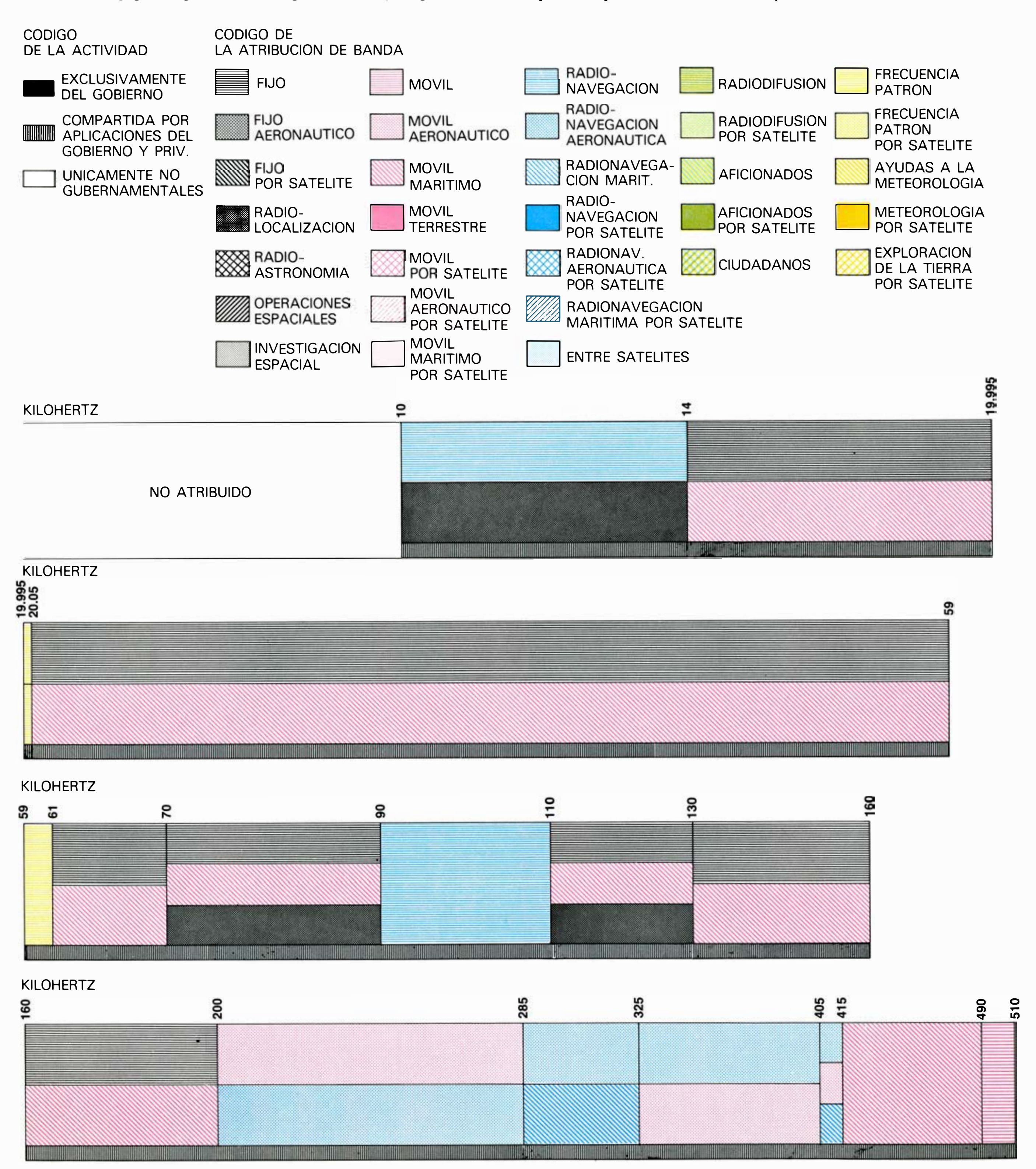
Cuando un locutor habla en el estudio, el micrófono transforma el sonido en señales eléctricas. Las cuales se envían por un cable desde el estudio al transmisor que se encuentra en High Island, 20 kilómetros al este de Nueva York, donde dichas señales modulan una onda electromagnética cuya frecuencia portadora es de 660 kilohertz. La onda modulada alimenta a una antena, desde donde se difunde en todas direcciones como radiación electromagnética.

Consideremos ahora un oyente con una radio portátil de transistores en Jones Beach, a unos treinta kilómetros del transmisor. La antena del equipo de radio capta una pequeña parte de la se-

ñal radiada. La radio selecciona la señal de la WNBC de entre todas las señales de radio que llegan á la antena, ya que el receptor está sintonizado a 660 kilohertz. La radio amplifica la señal y la demodula, recuperando así la señal eléctrica que representa la voz del locutor. La señal se aplica entonces a un altavoz que la transforma en sonido.

La radio capta únicamente una fracción minúscula de los 50 kilowatt que transmite la WNBC. Si la potencia transmitida se propagara por igual en todas las direcciones, la densidad de energía a una distancia de 30 kilómetros sería inferior a 0,000004 watt por metro cuadrado. En realidad, la potencia transmitida no se propaga uniformemente, puesto que el transmisor dirige la mayor parte hacia el horizonte. No obstante, el receptor de radio debe funcionar con se-

ESPECTRO RADIOELECTRICO atribuido en los Estados Unidos en una escala logarítmica que comienza en la parte inferior de esta página y continúa en las tres páginas siguientes. El código de colores que figura en esta página indica los diferentes servicios de comunicación que tienen atribuida una parte del espectro. El diagrama se basa en el preparado recientemente por el Departamento de Comercio y el Executive Office del Presidente.



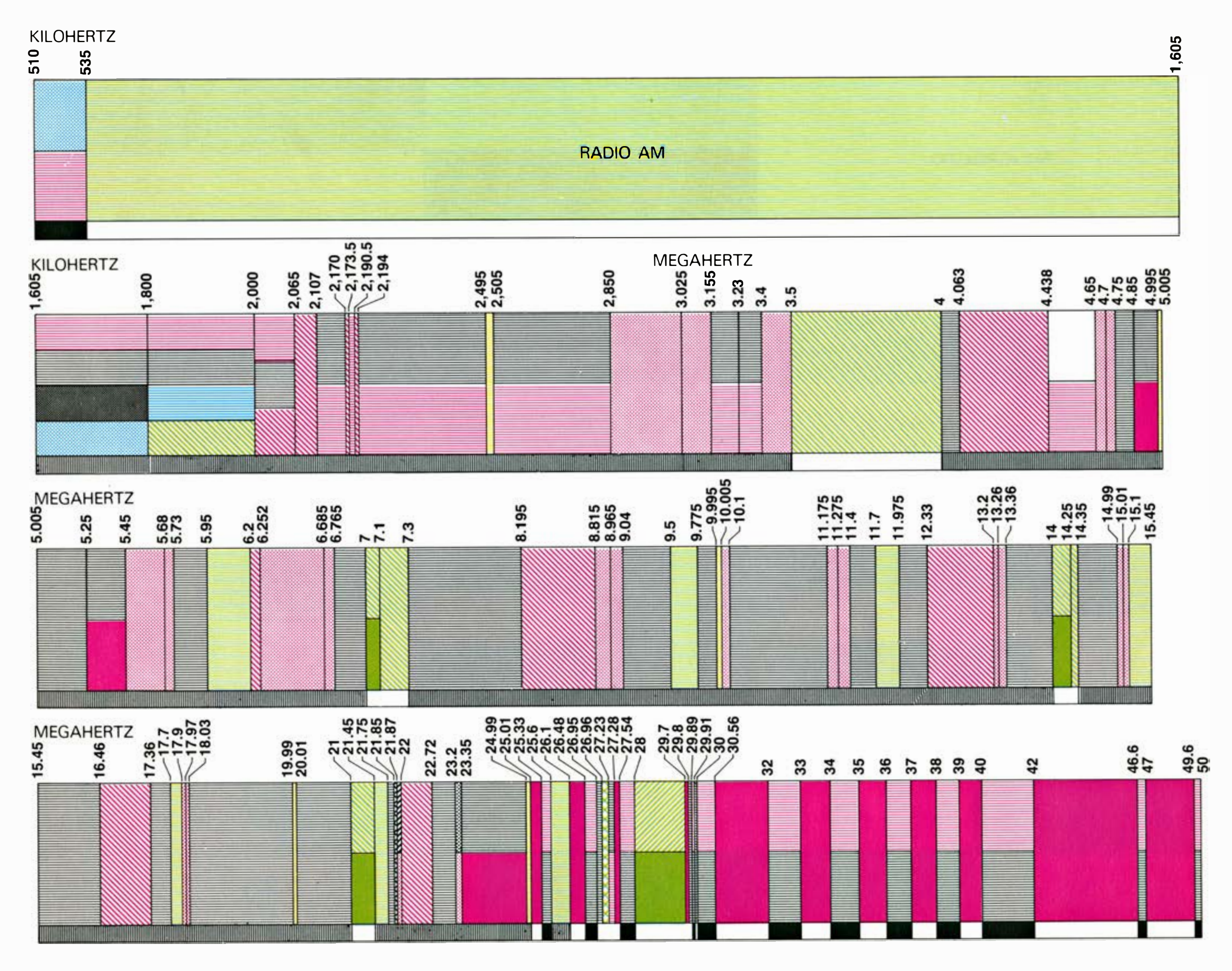
ñales del orden de la millonésima de watt.

El ruido, incluyendo diferentes tipos de ondas de radio interferentes, limita finalmente la posibilidad del receptor para captar una señal suficientemente débil. El ruido se puede generar tanto dentro del receptor como en procesos externos. El ruido externo proviene de muchas fuentes, pero puede clasificarse en tres grandes categorías: radiación natural, radiación accidental generada por el hombre y radiación de otros sistemas de comunicación. Los fenómenos naturales, principalmente los rayos, generan señales de radio que pueden interferir una comunicación. Los equipos eléctricos, tales como las máquinas de coser o las herramientas eléctricas, pueden generar ondas de radio capaces de interferir la comunicación, como cuando aparecen rayas horizontales en una pantalla de televisión al funcionar en un lugar próximo a una máquina eléctrica. Finalmente, todo transmisor de radio genera señales que constituyen ruido para cualquiera que esté intentando no recibir esa determinada señal. Un ejemplo lo constituye la experiencia generalizada de no poder sintonizar, por la noche, una determinada emisora de radio sin escuchar en el fondo otra emisora u oír un silbido molesto provocado por la interferencia.

El control de las interferencias es el principal objetivo de la atribución del espectro, e impone el desarrollo de planes sistemáticos para la utilización de frecuencias en radiocomunicación. Este proceso involucra generalmente tres etapas: la atribución, la asignación y el permiso de utilización. En la etapa de atribución se destinan ciertas regiones del espectro para aplicaciones específicas. Por ejemplo, la banda de 535 a 1605 kilohertz se reserva internacionalmente para la radiodifusión en AM.

El destinar regiones del espectro para utilizaciones compatibles claramente definidas simplifica el control de las interferencias. Las estaciones de televisión se interfieren mutuamente de forma simétrica: si la estación *A* interfiere a la *B*, ésta interfiere igualmente a la *A*. Sin embargo, un equipo de radio móvil y una emisora de radiodifusión pueden interferirse de forma asimétrica. Por ejemplo, un equipo de radio móvil puede interferir la recepción de la señal de televisión, mientras que la señal de la estación de televisión no afecta a la estación móvil. Por tanto, los incentivos para la cooperación y la coordinación son mucho mayores si se asigna un único tipo de usuarios a cada región del espectro.

Los métodos de asignación varían. Por ejemplo, no existe ningún método para los equipos de radio en banda ciudadana; domina la anarquía. En la banda de radiodifusión en AM y en las correspondientes a los equipos de radio móviles terrestres, el método consiste en dar servicio al primero que llegue. De esta forma, un presunto usuario busca un sitio en la banda donde sea posible la



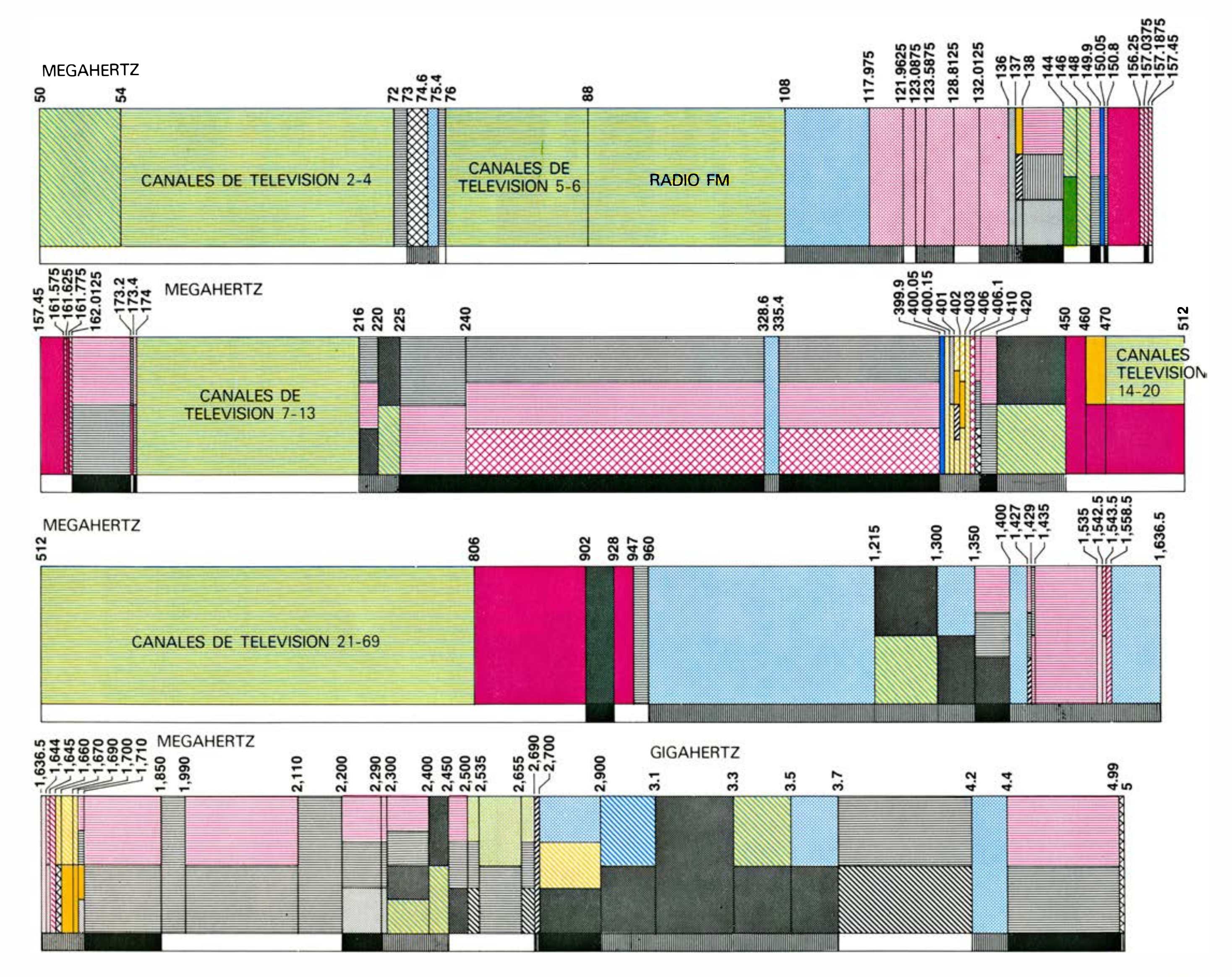
asignación. Si lo encuentra, registra su intención de utilizarlo y las nuevas asignaciones no deben entrar en conflicto con esta elección.

Algunas veces, los organismos reguladores estructuran más el proceso de asignación. La FCC preparó un cuadro de asignaciones para la difusión de televisión antes de otorgar los permisos de utilización en dicha banda. Los objetivos de la comisión fueron el simplificar el proceso de concesión de permisos y asegurar un equilibrio en la asignación de frecuencias a las distintas comunidades. La concesión de un permiso es una autorización específica a un radiodifusor para utilizar una frecuencia. Las etapas de asignación y concesión de permisos se combinan a menudo.

La atribución del espectro puede considerarse como la atribución de un recurso natural. Los problemas de atribución y gestión del espectro pueden considerarse también bajo otros puntos de vista. El más fundamental consiste en considerar el proceso de gestión del espectro como el medio de proporcionar la coordinación necesaria para evitar las interferencias. Aun en el caso de que estuvieran disponibles más del doble de los canales que podrían utilizarse nunca, sería todavía necesario registrar y coordinar las utilizaciones con el fin de evitar las interferencias.

Otro punto de vista considera la gestión del espectro fundamentalmente como la estructuración de las comunicaciones, en particular de las comunicaciones de masas. La política de radiodifusión incluye muchos elementos: normas técnicas, elección de un número de estaciones en cada comunidad, reglas sobre la propiedad y clases de servicios a proporcionar por el radiodifusor. En muchos países sólo el estado posee emisoras de radiodifusión. En Estados Unidos, la FCC impone a los propietarios de emisoras ciertos requisitos que no se exigen a los propietarios de otros medios. Por ejemplo, se obliga a las emisoras de radiodifusión a cubrir los sucesos controvertidos de importancia pública "correctamente". Tal regla no se aplica a los editores de periódicos, revistas o libros. El Tribunal Supremo norteamericano apoyó esta política estableciendo: "considerando la escasez de frecuencias para radiodifusión, el papel que desarrolla el gobierno en la atribución de frecuencias y las legítimas pretensiones de aquellos que no pueden tener acceso, sin ayuda gubernamental, a estas frecuencias para la expresión de sus puntos de vista, mantenemos que las disposiciones y reglamentación existentes a este respecto están autorizadas por decreto y son constitucionales".

El punto que hay que resaltar (al menos en Estados Unidos) es que la política de radiodifusión surge de la política de gestión del espectro. Puesto que el gobierno autoriza a unos a radiodifundir y excluye a otros, el resultado práctico es que debe disponer de un me-

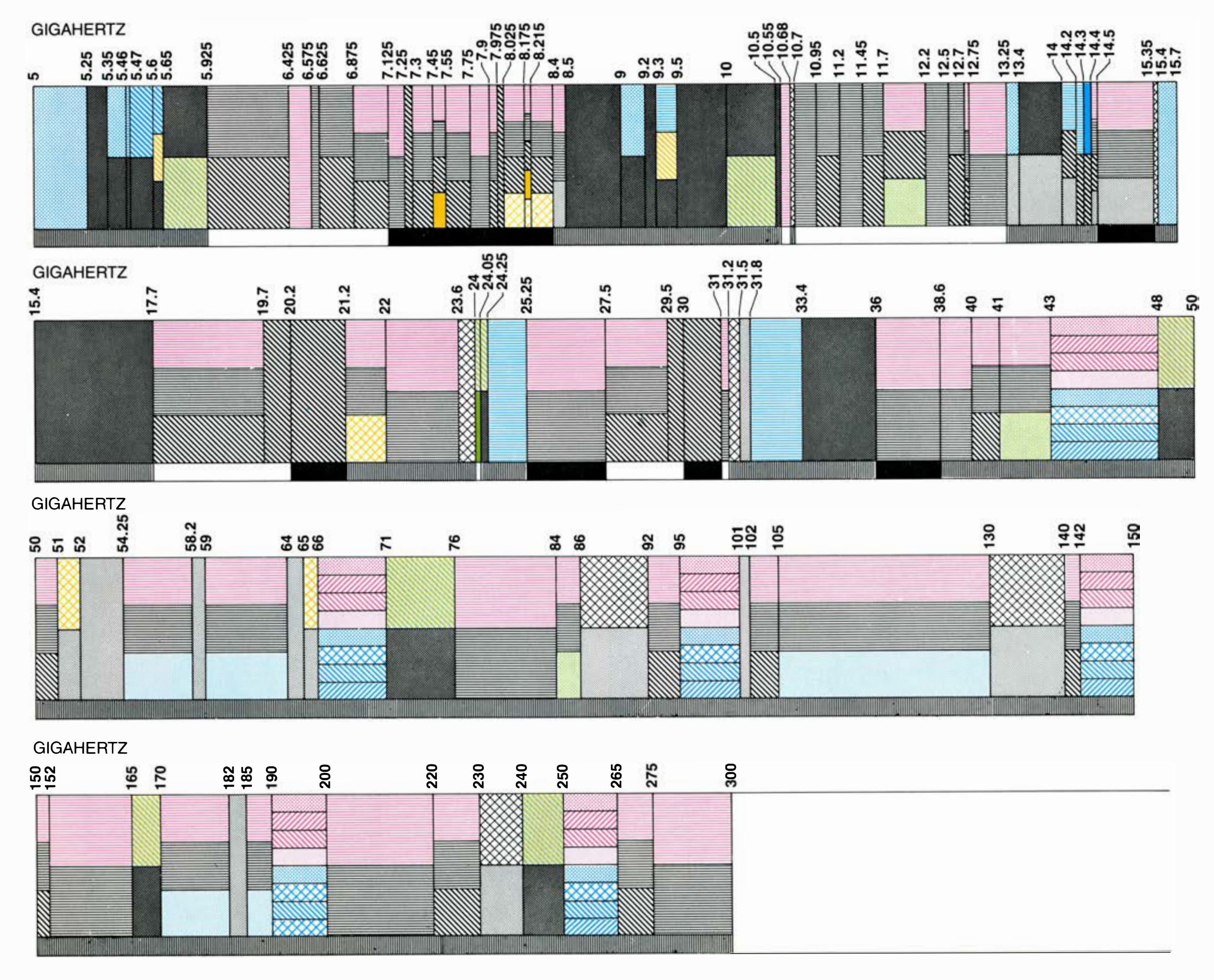


canismo para seleccionar entre los solicitantes. No hay nada en las leyes de la física o de la política que exija que el mecanismo de selección se base exclusivamente en normas técnicas. De hecho, las fuerzas políticas y sociales obligan a la consideración de criterios no técnicos para decidir quién debe dirigir las emisoras de radiodifusión. La política de atribución del espectro se ve así ligada a las actividades sociales y políticas.

La atribución del espectro puede también considerarse en términos económicos. Los economistas que escriben sobre la política de atribución del espectro tratan el espectro como un ejemplo de recurso natural (como la tierra o el agua) que requiere una gestión económica. Sin embargo, es éste un tipo de recurso no usual, en el cual las personas que están autorizadas a utilizarlo no pagan por ello y no pueden vender o compartir la atribución sin el permiso del organismo que lo otorga. Además, las grandes bandas del espectro se asignan a varios usuarios –radio y televisión comerciales, servicios de radio móviles, administración local, etcétera– que pueden utilizar su parte, pero no puede transferirse de un usuario a otro.

Otro aspecto de la atribución del espectro es la creación y distribución de la riqueza. La estrecha unión entre ambas se muestra mediante el mercado idealizado de televisión basándose en tres supuestos: (1) los ingresos totales por publicidad se fijan en 20 millones de dólares por año, independientemente del número de estaciones en el mercado; (2) el coste anual de funcionamiento para cada estación es de 3 millones de dólares, y (3) los ingresos se reparten por igual entre todas las estaciones. Si el organismo regulador asigna tres estaciones al mercado, cada una de ellas obtendrá un beneficio anual de 3,6 millones de dólares. La asignación de una cuarta estación reduciría el beneficio de cada una de ellas a dos millones de dólares y con una quinta estación el beneficio sería de un millón. Se puede ver lo sensible que es la economía de la radiodifusión a ligeras modificaciones en la política de instalación de estaciones de televisión y el incentivo que tienen los propietarios para oponerse a la introducción de nuevas cadenas en el mercado.

Históricamente la atribución del espectro ha seguido un esquema sencillo. La autoridad reguladora debía reservar una región del espectro para un servicio y establecer la reglamentación técnica. Los futuros usuarios debían solicitar los permisos sobre la base de que el primero que llegue es el primero a quien se da servicio. Los últimos que llegan deben concebir sus sistemas alrededor de los primeros. Este esquema se ha seguido de forma coherente tanto internacionalmente como en el interior de las naciones, con muy pocas excepciones. El sistema ha tenido (y en gran parte tiene aún) varias e importantes ventajas, entre ellas su sencillez, su bajo coste y el hecho de que se necesita un mínimo de transferencia de información para que funcione.



El sistema ha podido responder a la creciente demanda de un lugar en el espectro radioeléctrico, gracias a la afortunada circunstancia de que al mismo tiempo que crece la demanda avanza la tecnología, con lo que se puede explotar mayor parte del espectro y todo él se puede utilizar de forma más eficiente. Sin embargo, el sistema da lugar a ciertos problemas, el más importante de ellos puede ilustrarse comparando los sistemas telefónicos y los de radiodifusión y televisión en Estados Unidos. En 1960, Estados Unidos tenía 474 estaciones de televisión en la banda de ondas métricas (VHF), abarcando los canales de 2 a 13. Hoy existen 617. En 1945 este país disponía de 900 emisoras de radio en AM funcionando continuamente; actualmente la banda reservada para ellas ubica 2000 emisoras. En cuanto a la telefonía el Bell System empezó a principio de los años 50 a enviar algunas de sus comunicaciones telefónicas a través de radioenlaces de microondas. En aquel momento los sistemas de portadoras podían acomodar únicamente 2100 circuitos telefónicos en la banda de microondas. Hoy en día los equipos pueden acomodar 36.000 circuitos telefónicos en la misma banda.

Dicho de otra manera, la eficiencia técnica de los sistemas de radiodifusión en realidad no ha mejorado en absoluto, mientras que en el mismo período los sistemas de portadoras en microondas han mejorado su eficiencia en un 2000 por ciento. Esta disparidad surge de los incentivos que ofrece el sistema de gestión del espectro. La industria telefónica tiene un incentivo para desarrollar e instalar equipos que utilicen de forma más eficiente el espectro. Una emisora de radiodifusión no puede compartir tales beneficios, ya que todos ellos fluyen hacia otros (tales como vendedores de receptores de radio y televisión). De hecho, una tecnología más eficiente haría posible que en cada mercado funcionaran más emisoras, pero entonces los ingresos por publicidad de las emisoras existentes disminuirían.

Hay que reconocer también que la adopción de una nueva tecnología es más difícil en los sistemas de radiodifusión que en los de telefonía. La propiedad de un sistema de radiodifusión se divide entre el radiodifusor que posee la emisora y los oyentes que poseen los receptores. La mayor parte de la inversión se encuentra en los receptores. La mayoría de las modificaciones técnicas requieren cambios tanto en el transmisor como en el receptor y el coordinar cualquier modificación en los millones de receptores resultaría difícil.

Otro tipo de dificultad con el actual sistema surgió en la anterior asamblea general de la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones en Ginebra, reunida el último otoño (las asambleas generales, que tienen lugar cada 20 años aproximadamente, proporcionan los medios para que los miembros de la Unión Internacional de Telecomunicaciones atribuyan, a los distintos servicios, las regiones del espectro. Este grupo mantiene reuniones más frecuentes sobre temas específicos, tales como las comunicaciones por satélite. Todas las reuniones conllevan complicadas negociaciones multilaterales, cuyos resultados substanciales se recogen en tratados). Muchas de las naciones de más reciente creación, que fueron en tiempos colonias, se están moviendo activamente para instalar sus propios sistemas de comunicaciones por satélite y de radio en onda corta. Por tanto, luchan ferozmente para obtener lugares en el espectro, muchos de los cuales ya están ocupados o asignados a países desarrollados. Estos aspectos quedaron ampliamente sin resolver en la conferencia y permanecen, por tanto, pendientes.

Mucha gente ha presentado sugerencias detalladas para hacer que el proceso de atribución del espectro funcione mejor. Las sugerencias se pueden clasificar en tres categorías: (1) mejorar el actual sistema; (2) encontrar procedimientos para diseñar sistemas de radio que requieran una menor intervención humana, y (3) modificar los incentivos económicos de tal forma que todos los usuarios se vean estimulados a adoptar la tecnología más adecuada.

El actual sistema puede mejorarse al menos de dos formas. Una consiste en emplear más recursos (personal, dinero y ordenadores) para resolver el problema. Otra consiste en automatizar en un mayor grado el proceso tradicional. Ambos procedimientos se están ya aplicando en cierto grado. Los datos sobre las utilizaciones del espectro se guardaban en archivos manuales; actualmente se almacenan cada vez más de modo que puedan leerse a través de una máquina. En efecto, las búsquedas en archivos se realizan mediante ordenador en vez de manualmente. Los desembolsos para la gestión del espectro están creciendo.

Otra posible mejora en los Estados Unidos consiste en suprimir el actual sistema de dos cabezas que gestiona el espectro. Aunque en el pasado la división de autoridad entre la FCC y el presidente de los Estados Unidos ha funcionado razonablemente bien, una autoridad única para la atribución del espectro funcionaría probablemente mejor en las transferencias de atribuciones entre usuarios federales y civiles cuando tales transferencias sean posibles y adecuadas.

Las mejoras que se engloban bajo el título de diseños de sistemas radioeléctricos que requieren una menor intervención humana introducen el concepto que podría denominarse "banda de anarquía" (se han sugerido otros nombres tales como banda de libertad, banda de bullicio y banda de frontera. Todos ellos reflejan la relativa ausencia de una dirección formal inherente a este concepto). Para conseguir que funcione la "banda de anarquía" los organismos reguladores deben tomar dos decisiones iniciales para que las tareas subsiguientes de aplicación de la ley y de recogida de datos sean entonces mínimas.

En primer lugar los organismos reguladores deben designar una banda en la que pueda funcionar el principio de anarquía. Entonces deben definir la normativa técnica para los equipos que habrían de dar servicio en dicha banda. Deben elegirse las normas de forma que el sistema total pueda funcionar correctamente. La tarea posterior de los organismos reguladores consistirá en asegurar que sólo se pongan en servicio los equipos adecuados, y pueden verificar ese cometido controlando la venta de los equipos.

Un buen ejemplo de tecnología ideal para la banda de anarquía sería un equipo de radio con cobertura de 10 metros. Tales equipos serían especialmente adecuados para comunicaciones en el interior de una casa o entre casas vecinas con finalidades tales como alarmas antirrobo, mandos a distancias para puertas de garaje y otras aplicaciones de control remoto. La cobertura restringida de los transmisores excluiría las interferencias.

En cierta medida, el concepto de banda de anarquía se ha adoptado ya. La Advanced Research Projects Agency (ARPA), del Departamento de Defensa estadounidense, ha desarrollado un sistema denominado "radio de paquetes", que proporciona comunicación de voz y de datos con una cobertura de varios kilómetros. La esencia del sistema es que cada paquete o secuencia corta de datos se envía a través de un canal cualquiera disponible tomado de un grupo determinado. Un equipo de radio que esté recibiendo puede detectar un error en la

transmisión de un paquete debido al ruido o a interferencias; cuando se detecta tal error se transmite de nuevo el paquete de forma automática. En términos de utilización del espectro, este sistema puede describirse como atribución dinámica; esto contrasta con la atribución previa que caracteriza a la radio y televisión comerciales.

Los equipos de radio en banda ciudadana son otro ejemplo de funcionamiento en una banda de anarquía, aunque dista mucho de la solución ideal, ya que la reglamentación técnica que se aplica a esta banda es poco rigurosa. Como resultado, un usuario de esta banda se encuentra frecuentemente con excesivas interferencias. Aun así, la banda proporciona un servicio de comunicaciones con una actividad reguladora mínima.

La aplicación de las técnicas económicas a la gestión del espectro es al mismo tiempo prometedora y posible. Estas técnicas incluyen el gravar a los usuarios con una tarifa, subastando los lugares en el espectro e incluso asignando derechos de propiedad de forma que el usuario pueda comprar o negociar una atribución. Estos métodos proporcionarían al usuario un incentivo para aprovechar al máximo una atribución y ayudarían a encaminar la utilización del espectro hacia áreas de valor. Permitirían también a los organismos reguladores y a los usuarios tratar el espectro como cualquier otro recurso económico, la tierra o la electricidad por ejemplo. La legislación que autoriza la utilización de técnicas económicas en la gestión del espectro se presentó a las dos cámaras del Congreso por los presidentes de los respectivos subcomités. Además, en septiembre pasado, el presidente Carter envió al Congreso un mensaje apoyando la utilización de técnicas económicas en la gestión de la región del espectro no dedicada a la radiodifusión. Sin embargo, incluso con un apoyo de tan alto nivel será muy difícil poner en ejecución este plan porque a él se oponen muchos de los actuales usuarios del espectro.

Tanto el concepto de banda de anarquía como la aplicación de técnicas económicas pueden caracterizarse como intentos para alejarse del actual sistema centralizado y encaminarse hacia un sistema descentralizado dominado por los usuarios. Realmente los tres sistemas pueden coexistir, pues son complementarios. En efecto, las diferentes utilizaciones del espectro requieren diferentes técnicas de gestión. Ninguna solución única es ideal para todos los casos.

Mirando hacia el futuro, se puede predecir que el ya valioso espectro radioeléctrico lo será todavía más a medida que el coste de los recursos complementarios, particularmente los equipos electrónicos, disminuya. Por tanto, pueden preverse un aumento de las solicitudes de acceso al espectro y una creciente necesidad de mejor gestión. De las nuevas técnicas de gestión, la más fácil de adoptar y, por tanto, la más prometedora es la correspondiente al concepto de banda de anarquía. Esto puede aplicarse dentro de las restricciones del sistema normativo actual. Su esencia consiste en la sustitución de personal administrador de alto coste por equipo electrónico de bajo coste.

La controversia sobre la atribución del espectro se centra probablemente en dos áreas: la banda de UHF para televisión y las bandas para satélites. La banda de UHF atrae la atención debido a su utilidad y disponibilidad. Los diseñadores de sistemas de comunicaciones encuentran la banda de UHF muy adecuada para sus proyectos. Los equipos son baratos y la propagación de la señal, buena. Además, gran parte del espectro de UHF no se utiliza aunque esté nominalmente atribuido a la radiodifusión.

Esta situación proviene de las decisiones tomadas por la FCC cuando originalmente asignó los canales de UHF. La comisión asignó cuidadosamente los canales de UHF a ciudades, teniendo en cuenta los condicionamientos técnicos que minimizarían el coste al público de los aparatos de UHF. Debido a los progresos realizados en electrónica no se necesita seguir aplicando estos condicionantes. Todas las emisoras de UHF existentes podrían ocupar menos de la mitad de la actual banda de UHF, dejando así libre una parte significativa del espectro para ampliaciones de la radiodifusión o para otros servicios.

El problema de las comunicaciones por satélite proviene sobre todo del hecho de que deban ser estacionarios, es decir, el período de su órbita debe coincidir con el período de rotación de la Tierra. Los satélites están situados encima del Ecuador a una altitud de unos 35.000 kilómetros. Como sería de esperar, los sistemas de satélites a esa altitud son de incumbencia internacional. Los Estados Unidos deben coordinar su utilización del arco de órbita con otros países de América. Si los mercados para las comunicaciones por satélite se desarrollan rápidamente, pero la tecnología avanza con lentitud, seguramente surgirá una disputa sobre la utilización de la porción del espectro para satélites.

Elementos genéticos transponibles

Se apartan de las leyes que rigen la recombinación genética normal y enlazan segmentos de ADN no relacionados, al transferir grupos de genes en plásmidos, virus y cromosomas

Stanley N. Cohen y James A. Shapiro

La selección natural, como expuso Darwin hace más de un siglo, favorece a los individuos y poblaciones que adquieren caracteres potenciadores de la supervivencia y la reproducción La generación de variabilidad biológica, que da lugar a nuevas combinaciones de caracteres genéticos, algunas de ellas potencialmente ventajosas es, por tanto, un requisito fundamental para la evolución de las especies en ambientes heterogéneos y variables.

La información hereditaria está codificada en la secuencia de nucleótidos que constituyen las moléculas de ADN, el material hereditario. El proceso fundamental en la aparición de variabilidad genética es el cambio, o mutación, del ADN en algún gen de un individuo. Las mutaciones dan lugar a variaciones en la secuencia de nucleótidos, en general la sustitución de un nucleótido por otro. Ello puede conducir a un cambio en la cadena de aminoácidos que determinan la proteína codificada por el gen, y la consiguiente alteración de las propiedades de la proteína puede afectar a las características biológicas del organismo. Las mutaciones espontáneas son, no obstante, demasiado escasas como para que la variabilidad genética dependa de la aparición de nuevas mutaciones en cada generación, por lo que aquella está generada principalmente por la redistribución del vasto acervo de mutaciones acumuladas en una población a lo largo de muchas generaciones.

En los organismos superiores, la redistribución se lleva a cabo a través de la reproducción sexual. Los genes están dispuestos en dos juegos de cromosomas, uno heredado del progenitor femenino y otro del masculino; con ello se dispone siempre de dos copias de cada gen. A veces, los nucleótidos de una secuencia genética difieren ligeramente a causa de anteriores mutaciones, dando lugar a alelos distintos, o formas variantes de un mismo gen. Durante la producción de gametos (óvulos y espermatozoos) la fractura de parejas de cromosomas estructuralmente similares puede significar un intercambio recíproco de alelos entre los dos componentes de un par de cromosomas. Esta recombinación genética requiere que los segmentos de ADN que sufren el intercambio sean homólogos, es decir, que la secuencia de nucleótidos de un segmento de ADN sea muy similar a la secuencia del otro segmento, difiriendo sólo en los puntos en que se ha producido una mutación.

La capacidad que tienen los segmentos de ADN de distintos cromosomas de recombinar entre sí, facilita la diferenciación de los conjuntos de genes contenidos en los gametos de las plantas y animales complejos. Cada individuo produce muchos óvulos o espermatozoos, que potencialmente pueden unirse a espermatozoos u óvulos de muchos otros individuos. Se crea así dentro de una población un enorme número de posibilidades en la generación de diversidad genética. En ausencia de endogamia frecuente o intencionada, la posibilidad de que dos plantas o animales cualesquiera posean una dotación genética idéntica es prácticamente nula.

La variabilidad genética es igualmente importante en la evolución de los organismos inferiores, como las bacterias, donde también procede de la mutación. Las bacterias, sin embargo, no tienen más que un cromosoma, de forma que por lo general en una misma célula no se encuentran distintos alelos de un gen. La redistribución de los genes bacterianos requiere normalmente la entrada en una bacteria de un ADN que porte un alelo procedente de otra célula. Un mecanismo natural que lleva a cabo esta transferencia interbacteriana es la transducción: ciertos virus con capacidad de infección de células bacterianas toman fragmentos del ADN de una bacteria y transportan el ADN a otras células en el transcurso de infecciones posteriores. En otro proceso, denominado transformación, el ADN liberado por la muerte de la célula, o por otros procesos naturales, penetra simplemente en una célula atravesando la pared y la membrana celular. En un tercer mecanismo, la conjugación, están implicados ciertos segmentos circulares de ADN con capacidad de autoduplicación, denominados plásmidos, que pueden ser transferidos entre células bacterianas cuando se hallan en contacto físico directo.

Tanto si la información genética ha penetrado en la célula bacteriana por transducción como por transformación o conjugación, debe incorporarse al dispositivo hereditario del huésped para propagarse durante la división celular como parte del material genético. Al igual que sucede en los organismos superiores, esta incorporación se realiza mediante el intercambio de ADN homólogo; el gen entrante debe tener un equivalente alélico en el ADN receptor. Dado que la recombinación entre homólogos requiere una gran similitud entre los dos segmentos de ADN que se intercambian, sólo puede tener lugar entre fragmentos filogenética y estructuralmente relacionados. De esta forma, tanto en bacterias como en organismos superiores, la producción de variabilidad genética por este mecanismo queda reducida a lo que dan de sí los intercambios entre alelos distintos del mismo gen o entre genes distintos que tienen segmentos con secuencias nucleotídicas similares. Este requisito impone un severo límite a la tasa de evolución alcanzable a través de la recombinación homóloga.

Hasta hace poco, la mutación y la recombinación homóloga parecían ser los únicos mecanismos importantes de generación de diversidad biológica. Por sí solos parecían justificar el grado de diversidad observado en la mayoría de las especies; la limitación implícita en la recombinación homóloga, que impide el intercambio de información genética entre organismos no emparentados que carecen de un alto grado de similitud en la secuencia del ADN, parecía concorde tanto con una tasa modesta de evolución biológica como con la persistencia de es-

pecies distintas que mantienen su identidad básica de generación en generación.

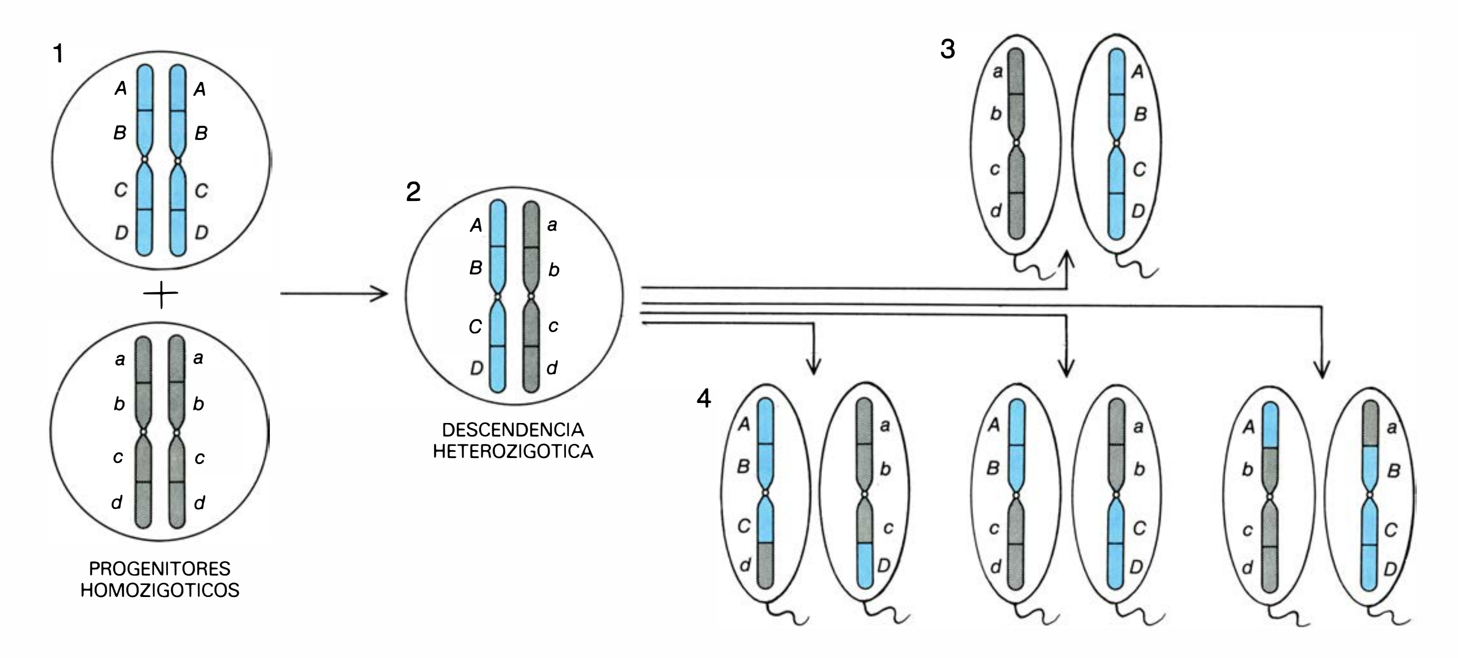
Durante la última década, no obstante, se ha evidenciado la existencia de ciertos procesos de recombinación "ilegítima" que pueden reunir segmentos de ADN con escasa o nula homología en la secuencia de nucleótidos, y que tales procesos desempeñan un papel significativo en la organización de la información genética, así como en la regulación de su expresión. Esta recombinación se efectúa a menudo por medio de elementos genéticos transponibles: diversos segmentos de ADN de características estructurales y genéticas de pequeña entidad, dotadas de capacidad para trasladarse entre cromosomas y moléculas extracromosómicas de bacterias y organismos superiores. Aunque los elementos transponibles han sido objeto de extensos estudios en células bacterianas, se descubrieron primero en las plantas, y se ha probado también su existencia en animales. Puesto que la recombinación ilegítima logra hilvanar segmentos de ADN con poca o ninguna relación ancestral, puede forzar a la evolución a dar grandes saltos. Lo mismo que pasos cortos.

A finales de los años 40, Barbara McClintock, de la Carnegie Institution of Washington's Department of Genetics en Cold Spring Harbor, Nueva York, comunicó por primera vez la observación de un fenómeno genético en el maíz, *Zea mays*, cuya existencia se comprobaría también posteriormente en otros sistemas biológicos. Durante el estudio de la herencia del color y la distribución de la pigmentación en plantas que habían sufrido ciclos sucesivos de fragmentación de los cromosomas, descubrió que la actividad de determinados genes se disparaba y se detenía anormalmente. Al hallarse asociados ciertos genes de esos con el desarrollo de pigmentos en los granos del maíz, y con la misma planta, algunos granos aparecían moteados, y presentaban manchas de pigmentación sobre un fondo incoloro. El modelo de variegación se reproducía en las sucesivas generaciones y se prestaba a un análisis similar al de cualquier otro carácter hereditario. Tras un concienzudo estudio que abarcó muchas generaciones de plantas de maíz, McClintock llegó a la conclusión de que la variegación observada era el resultado de la acción de distintas unidades genéticas, que denominó elementos controladores, que aparentemente podían desplazarse de un cromosoma a otro; de esta forma se comportaban como interruptores biológicos, permitiendo o evitando la expresión de los genes.

Su análisis genético demostró que algunos modelos de variegación afectaban, a la vez, a tres o más genes, lo que sugirió que se había reajustado la estructura de uno de los cromosomas de la



ADN DE UN ELEMENTO GENETICO transponible (un transposón); da lugar a una estructura característica en forma de tronco y asas, apreciable en esta micrografía obtenida por uno de los autores (Cohen). La estructura es consecuencia de la presencia de duplicaciones de secuencia invertida en los nucleótidos terminales del ADN del transposón (*véase la ilustración superior de la página 20*). El ADN de doble filamento del plásmido *pSC* 105, en el que se había insertado el transposón, fue desnaturalizado, permitiendo seguidamente la reunión de las secuencias nucleotídicas complementarias de cada filamento. La reunión de los nucleótidos complementarios que forman los terminales duplicados de secuencia invertida dan lugar al tronco de doble filamento. El asa menor está formada por el segmento de filamento simple del ADN del transposón comprendido entre las duplicaciones invertidas, segmento que incluye un gen que confiere resistencia al antibiótico kanamicina. El asa mayor representa el ADN de filamento simple de un miniplásmido derivado del plásmido huésped. El ADN se extendió con formamida y sombreado con platino-paladio. Aumento: 230.000 diámetros.



RECOMBINACION HOMOLOGA, realizada en los organismos superiores a través del "entrecruzamiento" de segmentos cromosómicos estructuralmente afines durante la reproducción sexual. El proceso se representa aquí para un animal hipotético cuyas células somáticas (las corporales) poseyeran un solo par de cromosomas, con cuatro genes, y cada uno de éstos con dos variantes alélicas. Los progenitores homozigóticos, es decir, con los mismos alelos en los cromosomas homólogos (*1*), darán lugar a una descendencia heterozigótica (*2*), que a su vez puede producir gametos (espermatozoos u óvulos) con copias de los cromosomas originales (*3*). A consecuencia del entrecruzamiento y de la recombinación homóloga recíproca, los alelos pueden volver a distribuirse de varias formas (*4*), originando gametos con cromosomas que diferirán de los cromosomas originales.

TRANSDUCCION

BACTERIA — VIRUS — A — INFECCION — CUBIERTA VIRICA VACIA — ADN VIRICO — FRAGMENTOS DE CROMOSOMA BACTERIANO — LISIS CELULAR — NUEVAS PARTICULAS VIRICAS — NUEVA BACTERIA — a — INFECCION

TRANSFORMACION

A — B — C — LISIS CELULAR — FRAGMENTOS DE ADN LIBRES — FRAGMENTO INCORPORADO POR LA NUEVA BACTERIA — a — b — c — RECOMBINACION

CONJUGACION

PLASMIDO — A — B — C — + — a — b — c — BACTERIA CON ALELOS A,B,C — TRANSFERENCIA DURANTE LA CONJUGACION — PLASMIDO — RECOMBINACION

RECOMBINACION EN BACTERIAS. Ese tipo de recombinación requiere la introducción en una célula bacteriana de un alelo procedente de otra célula. En la transducción un fago infeccioso, o virus bacteriano, extrae un segmento de ADN bacteriano portador del alelo *A* y lo incorpora a la partícula de virus en vez del ADN vírico. Cuando esta partícula infecta una nueva célula, el segmento de ADN bacteriano se recombina con el segmento homólogo, intercambiando el alelo *A* por el *a*. Durante la transformación, una célula cuyo cromosoma porta el alelo *b* toma del medio ambiente un segmento de ADN con el alelo *B;* los alelos se intercambian por recombinación homóloga (*ver ilustración superior*). En la conjugación, un plásmido localizado en una célula bacteriana puede transferir, durante un contacto celular, el cromosoma de ésta a otra célula cuyo cromosoma porte alelos de los genes del cromosoma transferido; también aquí el alelo *B* se intercambia por el *b* mediante recombinación entre segmentos homólogos.

planta en el lugar de acción de un elemento controlador. El examen microscópico directo de los cromosomas de maíz que contenían elementos de control confirmó que dichos elementos genéticos servían de punto de rotura y reunión del ADN, orginando así cambios, a veces diminutos, a veces enormes, en la estructura cromosómica.

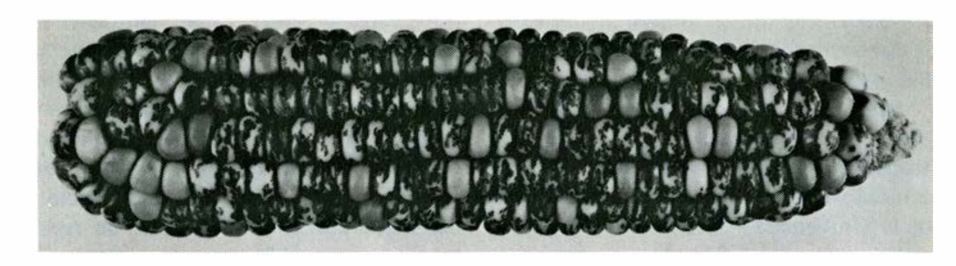
Unos 20 años después de la comunicación de los primeros estudios de McClintock sobre los elementos controladores de la planta del maíz, Michel Malamy, actualmente en la Facultad de Medicina de la Universidad de Tufts, Elke Jordan, Heinz Saedler y Peter Starlinger, de la Universidad de Colonia, y uno de los autores (Shapiro), por entonces en la Universidad de Cambridge, descubrieron un nuevo tipo de mutaciones en genes de una cepa de laboratorio de la bacteria intestinal común *Escherichia coli*. La singularidad de estas mutaciones estribaba en que sus efectos eran detectables más allá de los límites de los genes mutados; esta propiedad no podía explicarse por medio de ningún mecanismo mutacional conocido hasta entonces.

Al insertar los segmentos de ADN portadores de estas mutaciones en partículas (viriones) de un virus bacteriano y comparar la densidad de éstos con virus portadores de genes normales, se hizo evidente que el ADN mutado era más largo que el ADN normal: las mutaciones habían sido provocadas por la inserción en el gen mutado de un fragmento de ADN de regular tamaño. Se descubrió posteriormente que un cierto número de otros tipos de segmentos de ADN de tamaño observable, de hasta 2000 nucleótidos de longitud, podían también insertarse en distintos genes, interrumpiendo su continuidad y deteniendo así su actividad. Estos elementos fueron denominados secuencias de inserción, o elementos IS. La observación de que un reducido número de segmentos específicos de ADN podía insertarse en un gran número de puntos distintos del cromosoma bacteriano, sugirió que debía tener lugar algún tipo de recombinación no homóloga; no parecía probable que un elemento IS fuera homólogo a las secuencias nucleotídicas de lugares de inserción tan diversos.

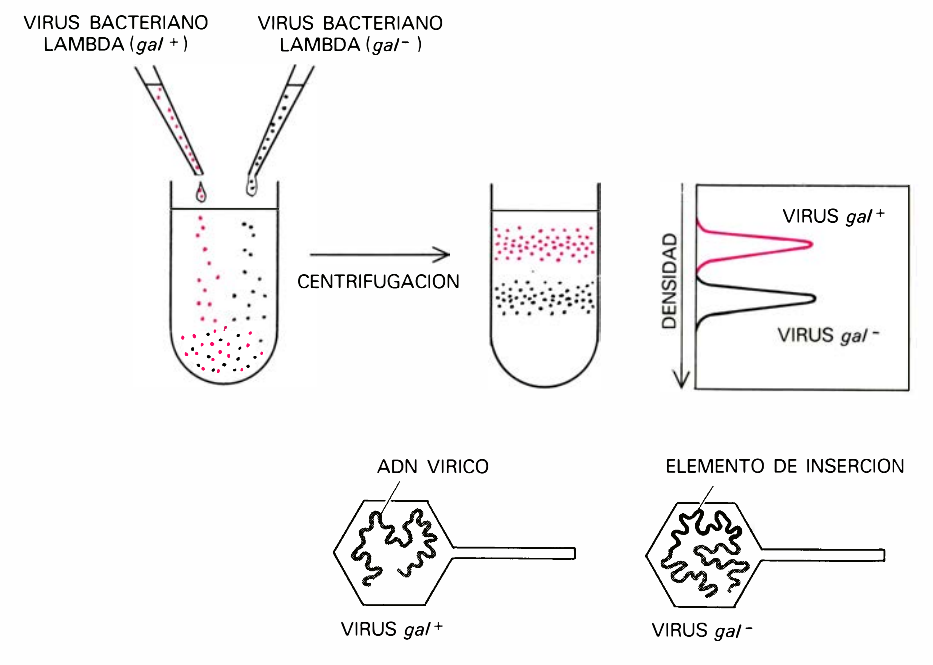
Casi simultáneamente con el descubrimiento de los elementos IS, otros microbiólogos y genetistas lograron efectuar algunas observaciones que insinuaban que ciertos genes bacterianos responsables de la resistencia a antibióticos eran capaces de trasladarse de una molécula de ADN a otra. Los resultados logrados por Susumu Mitsuhasi y sus colegas, de la Universidad de Tokyo, a mediados de los años 60, sugerían que un gen que codificaba para una proteína que inactivaba el antibiótico cloranfenicol podía desplazarse desde su lugar normal, en un plásmido, hasta el cromosoma de una bacteria o hasta el ADN de un virus.

En los Estados Unidos y Gran Bretaña se comunicaron casos similares de una aparente transferencia de genes resistentes a los antibióticos entre moléculas distintas de ADN de una misma célula. La primera prueba directa de una transferencia mediante un proceso análogo a la inserción de los elementos IS se publicó en 1974, cuando R.W. Hedges y A.E. Jacob, del Hammersmith Hospital de Londres, descubrieron que la transferencia entre plásmidos de un gen generador de resistencia a antibióticos como la penicilina y la ampicilina iba siempre acompañada de un incremento en el tamaño del plásmido receptor; el receptor podía después transferir el carácter resistente a otros plásmidos, que evidenciaban entonces un aumento de tamaño similar.

Hedges y Jacob postularon que el gen que provocaba la resistencia a la ampicilina se encontraba en un elemento de ADN capaz de ser "transpuesto", es decir que podía desplazarse de una molécula a otra, y lo denominaron transposón. El descubrimiento de un elemento transponible que contenía un gen que confería resistencia a un antibiótico supuso un importante paso adelante. En los estudios anteriores, el movimiento de los elementos IS sólo podía seguirse de forma indirecta mediante técnicas genéticas: observando los efectos de la inserción sobre diversas propiedades genéticas del organismo huésped. Ahora se hacía posible un seguimiento directo de los desplazamientos intermoleculares de



DIFERENCIAS DE PIGMENTACION de los granos del maíz *Zea mays*. Esas diferencias reflejan la actuación de un sistema de control de dos elementos descubierto por Barbara McClintock, del Cold Spring Harbor Laboratory. Los dos son elementos transponibles. Un elemento se encuentra en el locus de un gen, modulando su acción para dar lugar a la pigmentación tenue y homogénea de los granos. El otro elemento actúa sobre el primero provocando el aspecto variegado apreciable en muchos granos.

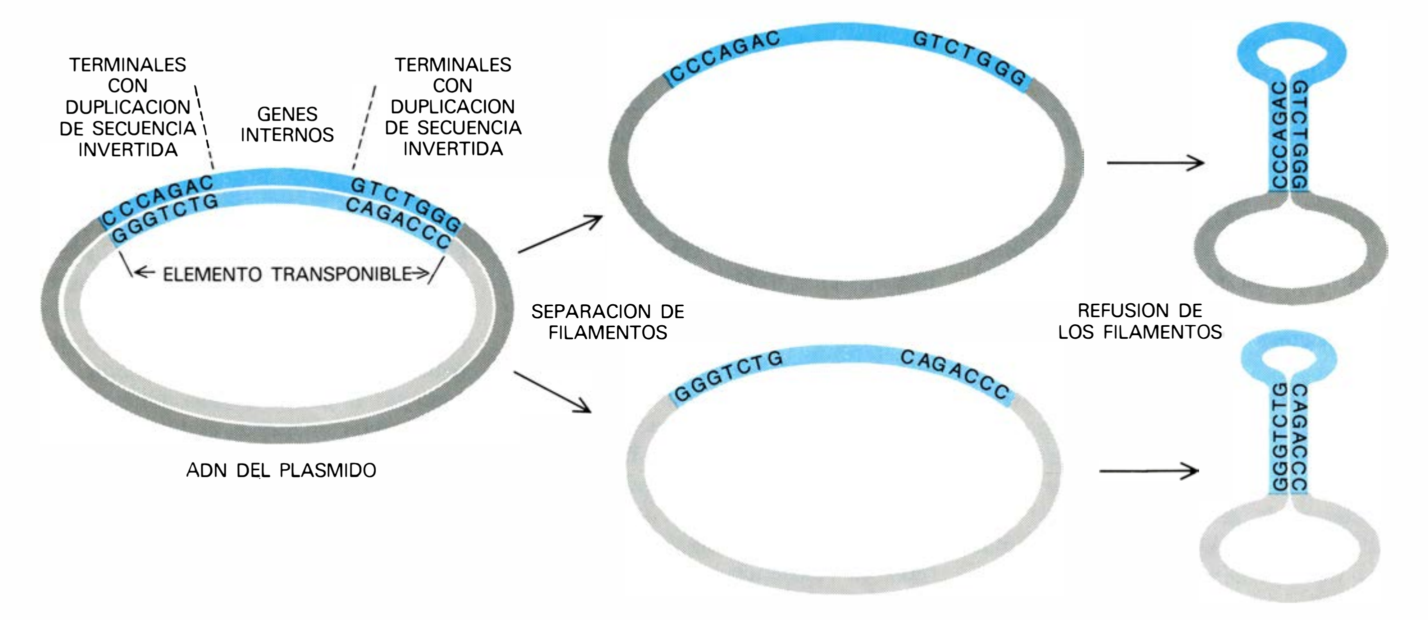


MUTACION POR INSERCION, demostrada por uno de los autores (Shapiro) mediante partículas del fago lambda portadoras del gen bacteriano que permite la utilización de la galactosa (*gal*+) y partículas portadoras del gen mutante *gal*−. Se centrifugó el virus en una solución de cloruro de cesio. Las partículas *gal*− resultaron ser más densas. Puesto que las partículas víricas tenían el mismo volumen y sus cubiertas externas poseían la misma masa, la mayor densidad de las partículas *gal*− demostraba que contenían una molécula de ADN más grande: la mutación *gal*− se debía a la inserción de ADN.

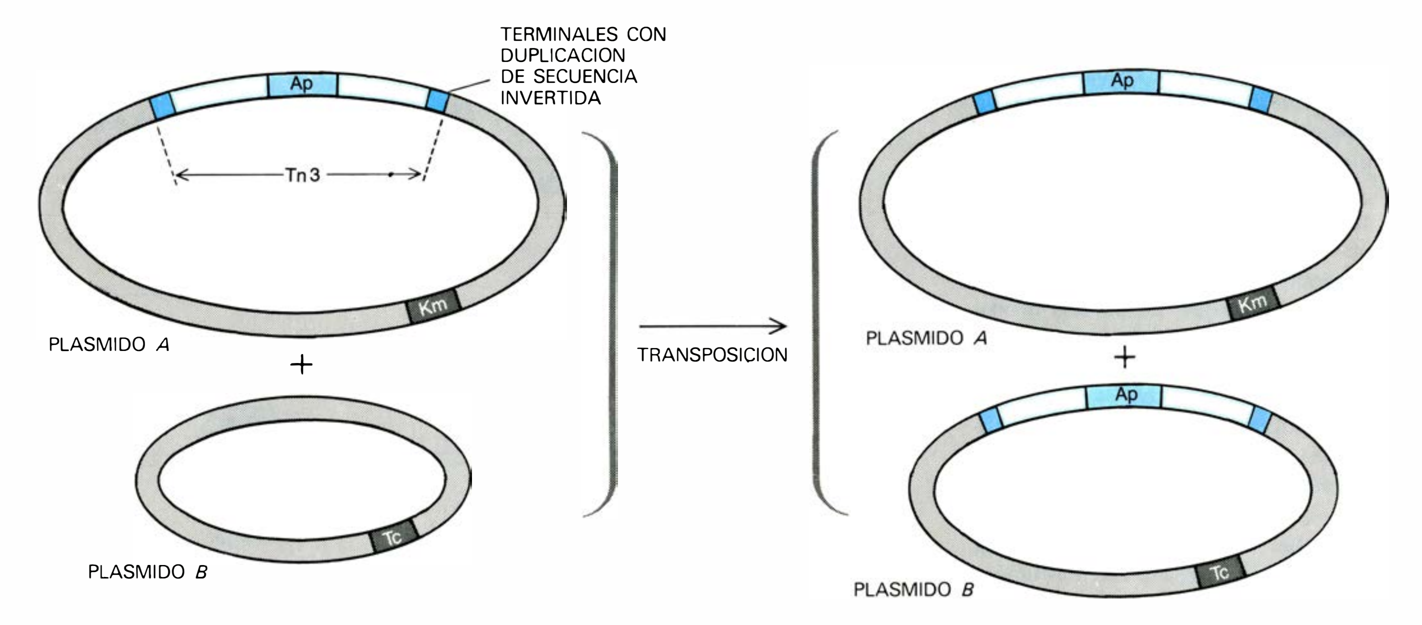
los elementos transponibles observando la herencia del carácter de resistencia a los antibióticos.

Paralelamente al desarrollo de los experimentos de Hedges y Jacob, Dennis J. Kopecko y uno de los autores (Cohen) estudiaron, en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, la adquisición por plásmidos de un gen que confería resistencia a la ampicilina. Resultó, como habían descubierto Hedges y Jacob, que el carácter "resistente a la ampicilina" presente en un plásmido podía ser adquirido por otro plásmido. Con gran sorpresa, observamos que esta transferencia tenía lugar también en bacterias mutantes que carecían de la proteína codificada por el gen *recA*, necesaria para la recombinación homóloga. El examen al microscopio electrónico del ADN del plásmido puso de manifiesto que el segmento de 4800 nucleótidos que contenía el carácter de resistencia a la ampicilina era transferido en forma de una unidad estructural característica y distinguible. Es más, el segmento podía insertarse en muchos puntos distintos del ADN del plásmido receptor.

La microscopía electrónica mostró también que los dos extremos del segmento de ADN transponible estaban dotados de una característica única: consistían en dos secuencias complementarias de nucleótidos dispuestas en orden inverso. Este descubrimiento necesitaba de alguna explicación. Las cuatro bases nitrogenadas que caracterizan los nucleótidos de ADN forman pares complementarios mediante enlaces de hidrógeno en la doble hélice de ADN: la adenina (*A*) se enlaza con la timina (*T*) y la guanina (*G*) con la citosina (*C*). La secuencia de nucleótidos *AGCTT*, por ejemplo, es complementaria de la se-



ESTRUCTURAS EN TRONCO Y ASAS que prueban la existencia de duplicaciones de secuencias nucleotídicas invertidas en las terminaciones de los elementos transponibles. Las cuatro bases, adenina (*A*), guanina (*G*), timina (*T*) y citosina (*C*), de los cuatro nucleótidos constitutivos del ADN, se enlazan entre sí formando una hélice (mostrada aquí de forma esquemática como un doble filamento); *A* se enlaza siempre con *T* y *G* con *C*. Los terminales de un elemento transponible poseen secuencias (en este caso de siete nucleótidos) que son tanto bidireccional como rotacionalmente simétricas. Al separarse los dos filamentos de un plásmido que contiene un elemento y permitir la fusión consigo mismo, los nucleótidos complementarios de las terminaciones se enlazan entre sí, dando lugar a un tronco de doble filamento. El ADN restante se ve como asas de ADN de un filamento.

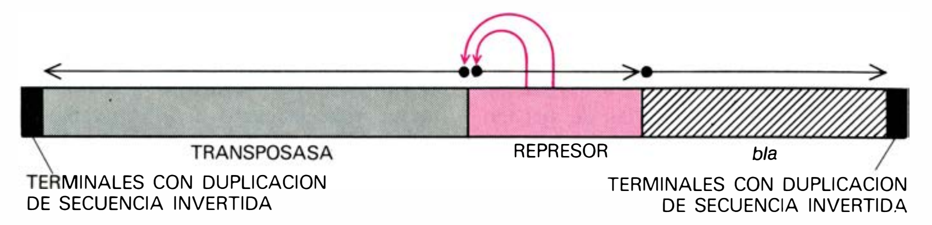


TRANSPOSICION del transposón Tn3, portador de un gen que confiere resistencia al antibiótico ampicilina (*Ap*). El transposón está incluido en principio en el plásmido *A*, que contiene también un gen que proporciona resistencia al antibiótico kanamicina (*Km*). El plásmido *B*, que confiere resistencia a la tetraciclina (*Tc*), adquiere una copia del transposón. El nuevo plásmido *B* proporciona resistencia a la ampicilina y a la tetraciclina.

cuencia *TCGAA*. La secuencia de nucleótidos de un final resultó ser complementaria en sentido contrario a la secuencia que tenía el extremo opuesto del mismo filamento [*véase la ilustración superior de la página 20*]. Estas duplicaciones invertidas pudieron apreciarse cuando en el laboratorio se separaron los dos filamentos del ADN del plásmido que portaba el transposón y se dejó que cada uno se "refundiera" consigo mismo: apareció una estructura en tronco y asas característica, generada por la presencia de las duplicaciones invertidas complementarias.

A consecuencia del proceso de transposición, un segmento de ADN, en principio presente en una molécula, se transfiere a una molécula distinta sin homología genética con el elemento transpuesto ni con el ADN donante. El hecho de que el proceso no requiera del producto del gen bacteriano necesario para la recombinación homóloga indica que la transposición se efectúa por medio de un mecanismo distinto del usual en los procesos normales de recombinación.

Los experimentos posteriores llevados a cabo en numerosos laboratorios han demostrado que los segmentos de ADN portadores de genes que codifican para una gran variedad de caracteres de resistencia a antibióticos pueden transferirse entre moléculas de ADN en forma de unidades discretas. Más aún, se ha demostrado que también pueden transponerse genes que codifican para otros caracteres, como la resistencia a compuestos tóxicos de mercurio, la síntesis de toxinas bacterianas y la capacidad de fermentar azúcares o metabolizar carbohidratos. Todos los transposones estudiados hasta ahora contienen terminales duplicados de secuencia invertida, de una longitud que varía entre unos pocos nucleótidos y unos 1400. Los terminales de por lo menos dos transposones consisten en dos copias de la secuencia de inserción IS1 (que asimismo contiene terminales duplicados de secuencia invertida). Datos recientes han sugerido que la inserción de un gen entre dos elementos transponibles permite la transferencia del gen a una molécula de ADN sin relación estructural mediante recombinación no homóloga.

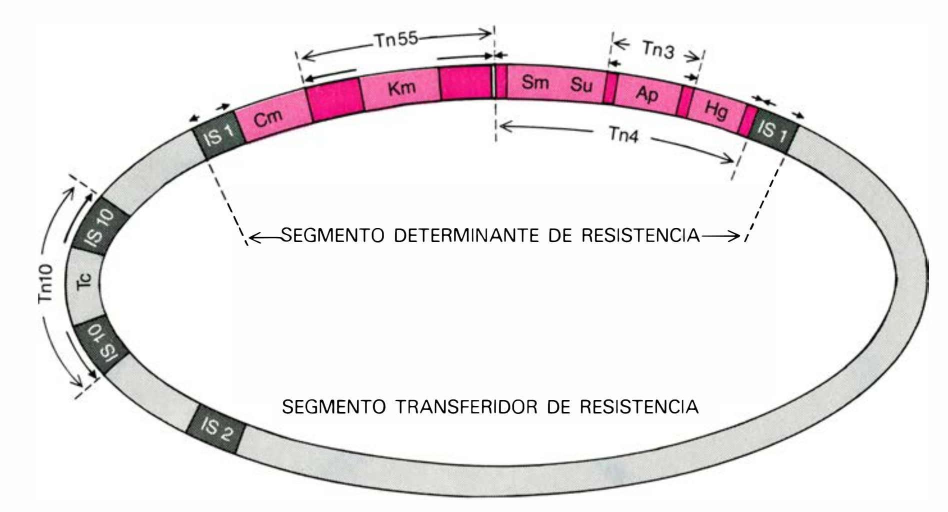


COMPONENTES FUNCIONALES del transposón Tn3, sin respetar la escala. El análisis genético prueba la existencia de, al menos, cuatro regiones: los terminales con secuencias invertidas duplicadas; un gen que codifica para el enzima beta-lactamasa (*bla*), que proporciona resistencia a la ampicilina y otros antibióticos relacionados; un gen que codifica un enzima requerido en la transposición (una transposasa), y otro gen de una proteína represora que controla la transcripción de los genes de la transposasa y del mismo represor. Las flechas señalan el sentido de la transcripción del ADN.

Dado que los elementos transponibles se transfieren en forma de unidades genéticas discretas y características, debe haber algún mecanismo enzimático altamente especializado capaz del reconocimiento de sus terminales duplicados de secuencia invertida y del punto exacto de rotura del ADN. Las primeras pruebas de que los genes transportados por elementos transponibles podían codificar para dichos enzimas, proceden de una serie de experimentos realizados por Frederick L. Heffron Craig Rubens y Stanley Falkow en la Universidad de Washington y proseguidos por Heffron y sus colegas en la Universidad de California en San Francisco. Estos investigadores introdujeron mutaciones que interrumpían la continuidad de los genes en diversos puntos comprendidos dentro del transposón que confería resistencia a la ampicilina, designado Tn3, y apreciaron alteraciones en la capacidad del elemento para actuar como transposón. Las mutaciones provocadas en los terminales duplicados de secuencia invertida o en una determinada zona del segmento de ADN comprendida entre los finales impedía la transposición. Por otro lado, las mutaciones provocadas en otra región del Tn3 en realidad incrementaban la frecuencia de movimiento del Tn3 entre los distintos plásmidos, lo que sugería que esta región debía contener un gen que modulara la capacidad del Tn3 de sufrir una transposición.

Los trabajos de Joany Chou, Peggy G. Lemaux y Malcom J. Casadaban efectuados en el laboratorio de uno de nosotros (Cohen) y los de Ronald Gill en el laboratorio de Falkow, publicados todos ellos recientemente, han demostrado que el transposón Tn3 codifica de hecho para una "transposasa" (enzima requerido en la transposición) y para una substancia represora que regula tanto la transcripción a ARN del gen de la transposasa como la propia síntesis del represor. Experimentos análogos realizados en la Universidad de Chicago, en la Universidad de Wisconsin y en la de Harvard han probado que otros elementos transponibles también codifican para proteínas necesarias en su propia transposición.

Aun cuando los transposones pueden insertarse en muchos puntos de la molécula de ADN receptora, su inserción no se efectúa al azar. Se sabe desde hace varios años que determinadas regiones del ADN son más propicias a la inserción de los transposones. Ensayos comunicados recientemente por David Tu



PAPEL DE LOS ELEMENTOS TRANSPONIBLES en la evolución de los plásmidos resistentes a antibióticos, representado a partir de un mapa esquemático de un plásmido, portador de muchos genes conferidores de resistencia. El plásmido parece haberse formado de la unión de un segmento determinador de resistencia y un segmento transferidor de resistencia; en los puntos de unión donde los dos segmentos pueden disociarse de forma reversible se encuentran elementos de inserción (*IS 1*). Los genes que proporcionan resistencia a los antibióticos cloranfenicol (*Cm*), kanamicina (*Km*), estreptomicina (*Sm*), sulfonamida (*Su*) y a la ampicilina (*Ap*) así como al mercurio (*Hg*) están reunidos en el segmento determinador de resistencia, integrado por varios elementos transponibles; los terminales con duplicaciones de secuencia invertida se indican mediante flechas dirigidas hacia afuera de los elementos. En el segmento transferidor de resistencia se encuentra un transposón que codifica para la tetraciclina (*Tc*). El transposón Tn3 está incluido en el Tn4. Cada transposón puede ser transferido independientemente.

y uno de nosotros (Cohen) han mostrado que el Tn3 se inserta preferentemente en las proximidades de secuencias nucleotídicas similares a las de sus terminales duplicados de secuencia invertida; esta preferencia se aprecia incluso cuando la transposición tiene lugar en bacterias que carecen de la proteína *recA* requerida en la recombinación homóloga normal. Parece, pues, que el reconocimiento de las secuencias homólogas de ADN podría desempeñar algún papel en la determinación de la frecuencia y especificidad de la recombinación asociada a los transposones, aunque el mecanismo real difiera del que normalmente está asociado al intercambio de segmentos homólogos de ADN.

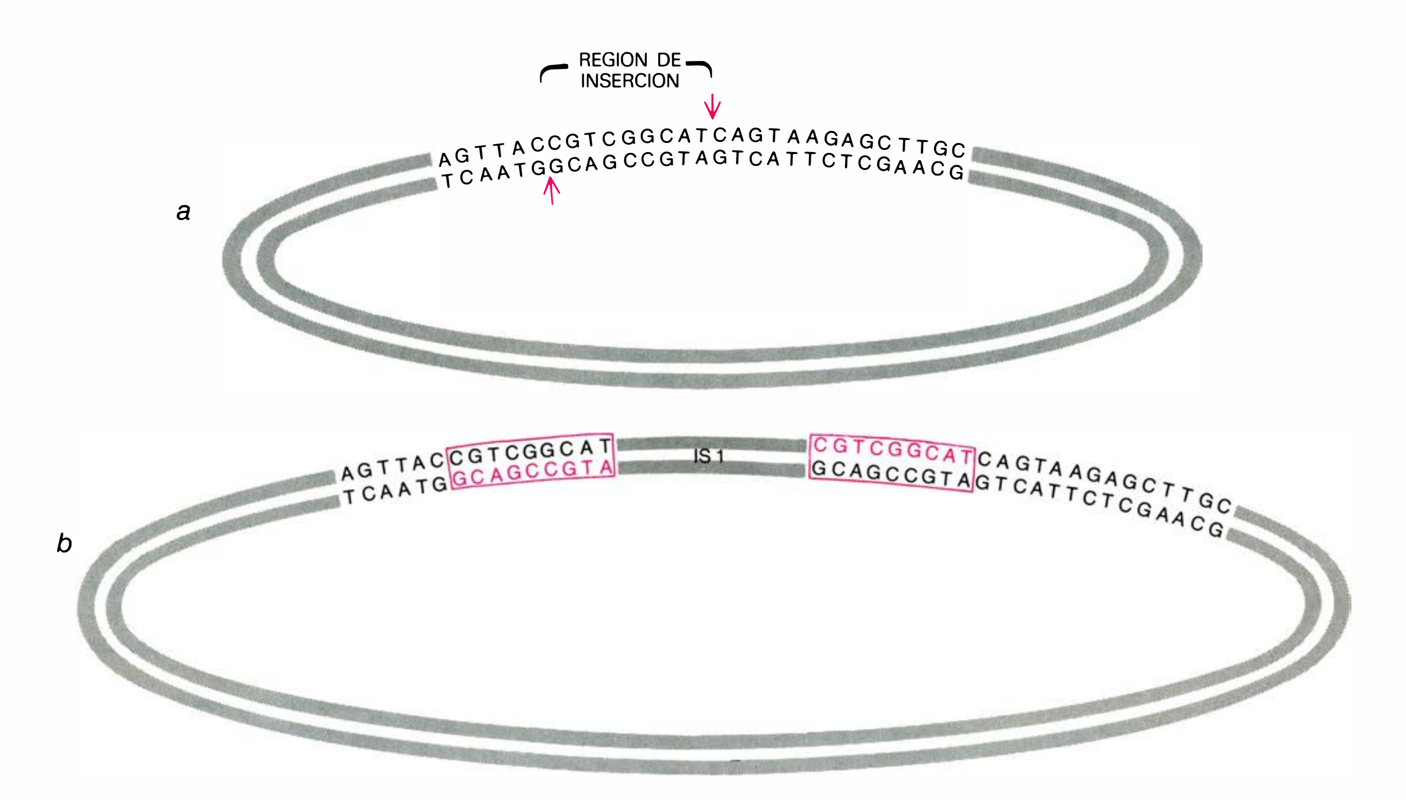
El descubrimiento del proceso de la transposición aclaró un fenómeno enrevesado de la evolución bacteriana que tenía graves consecuencias para la salud pública: la rápida dispersión, entre las bacterias, de la resistencia a antibióticos. Bajo la presión selectiva de una extensa administración de antibióticos en medicina humana y veterinaria y su utilización como complemento en la alimentación animal, las bacterias portadoras de genes resistentes adquieren una gran ventaja natural. Desde hacía algún tiempo se sabía que la resistencia a varios antibióticos diferentes podía transmitirse simultáneamente a nuevas bacterias a través de un plásmido, pero hasta el descubrimiento de la transposición no se conocía cómo varios genes que proporcionaban resistencia a diferentes antibióticos se acumulaban en una sola molécula de ADN plasmídico. La explicación parece ser que los segmentos determinantes de resistencia en los plásmidos resistentes a fármacos han evolucionado en forma de conjuntos de transposones, portando cada uno de ellos un gen que confiere resistencia a uno o varios antibióticos.

Los trabajos realizados en Stanford, los de Phillip A. Sharp y otros efectuados en el laboratorio de Norman R. Davidson en el Instituto de Tecnología de California han revelado que ciertos plásmidos bacterianos están estructurados de forma modular. Los plásmidos, aislados en distintas partes del mundo, mostraban una vasta homología secuencial en determinados segmentos de su ADN, mientras que en otros segmentos no presentaban ninguna similitud estructural. En ciertos casos los plásmidos se disociaban reversiblemente en determinados puntos. Los elementos transponibles IS se hallaban tanto en dichos puntos como en lugares donde el plásmido interaccionaba con el ADN cromosómico para promover la transferencia de cromosomas entre distintas células bacterianas.

En las especies bacterianas que intercambian genes de forma natural se encuentran a menudo transposones idénticos. Además, los transposones que confieren resistencia a antibióticos parecen ser capaces de trasladarse entre especies de bacterias muy distintas, de las que hasta ahora se ignoraba su capacidad de intercambio de genes. Por ejemplo, recientemente se ha descubierto que ciertas secuencias del ADN, idénticas en parte al Tn3, son las responsables de la resistencia a la penicilina en dos especies bacterianas no relacionadas con las especies que habitualmente son huéspedes del Tn3 y en las que hasta ahora no se había observado esta resistencia. En otras palabras, los elementos transponibles parecen llevar a cabo en la naturaleza manipulaciones génicas semejantes a las que, realizadas en el laboratorio, han sido denominadas prácticas de ingeniería genética.

Los efectos de los elementos genéticos

ENTRE LAS REDISTRIBUCIONES CROMOSOMICAS mediadas por el virus bacteriano Mu se encuentran la fusión de un replicón, la delección adyacente, la inversión adyacente y la transposición de segmentos del cromosoma a un plásmido. Mu aparece en color; una pequeña flecha señala su orientación. En una célula lisogénica para Mu (que tiene el ADN de Mu integrado en un cromosoma) y que contiene el ADN de un virus lamba *gal*⁺ (*a*), el ADN del virus queda integrado en el cromosoma entre dos copias de Mu. En una célula lisogénica en que Mu se encuentra próximo a los genes integrados *gal*⁺ (*b*), los genes *gal*⁺ sufren delección. En una bacteria lisogénica masculina (*c*) con Mu localizado cerca del origen de transferencia del cromosoma (*flecha mayor, en el centro de la ilustración*), el origen queda invertido entre dos copias de Mu orientadas en oposición. En una bacteria lisogénica portadora de un plásmido (*d*), un gen bacteriano his⁺ es transpuesto al plásmido entre copias de Mu.



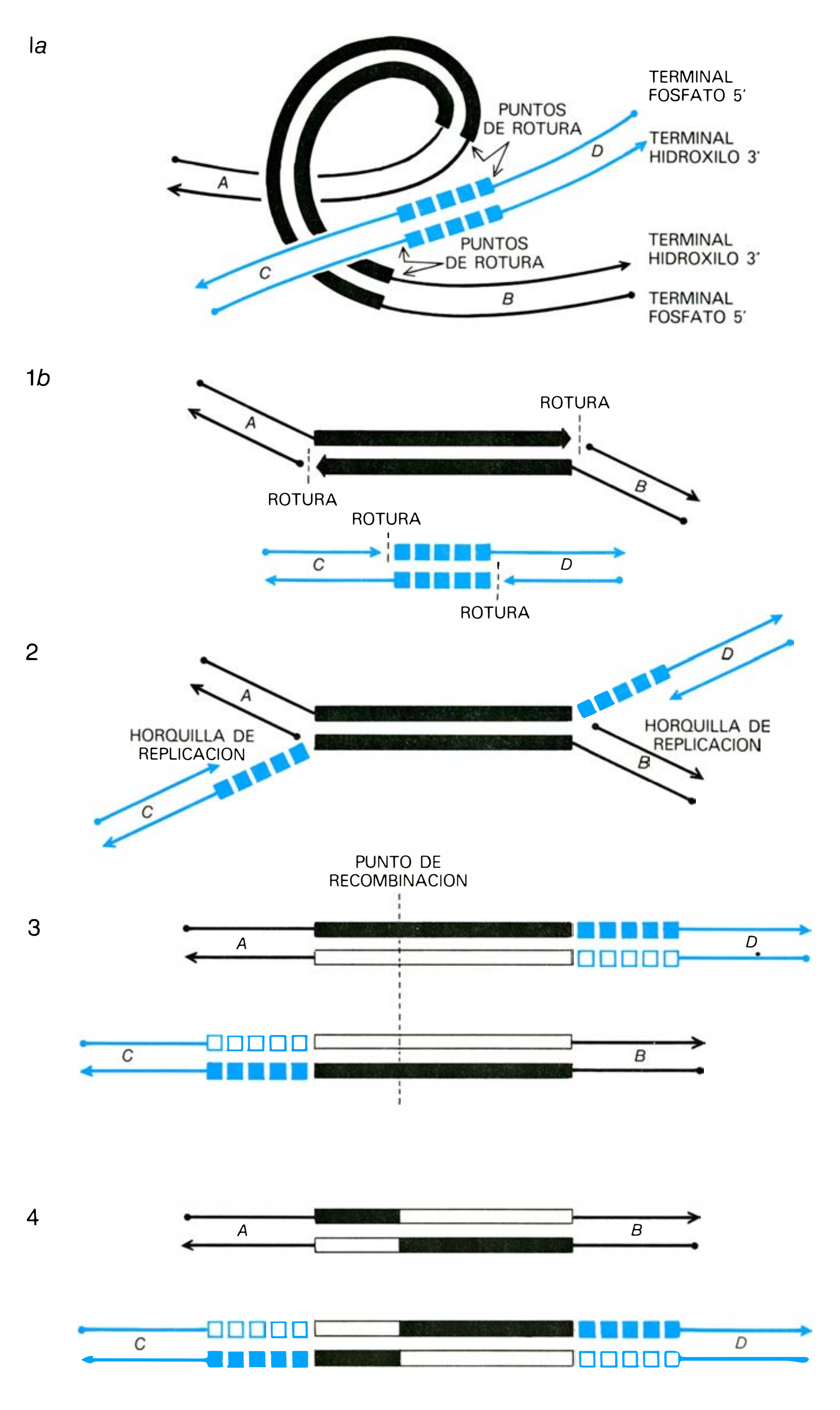
LA DUPLICACION de cinco, nueve u once pares de nucleótidos del ADN receptor va asociada a la inserción de un elemento transponible; las dos copias rodean el elemento insertado. En este caso, la duplicación que deriva de la inserción del IS 1 se ha ilustrado de manera que indique cómo puede tener lugar la duplicación. La inserción del IS 1 provoca la duplicación de nueve nucleótidos. Si los dos filamentos del ADN receptor son seccionados (*flechas de color*) de forma escalonada en dos puntos separados por nueve nucleótidos (*a*), el posterior relleno de los filamentos simples a cada lado del elemento insertado (*b*) con los nucleótidos correspondientes (*color*) da lugar a las secuencias duplicadas (*recuadros en color*). (Diseño de Bunji Tagawa.)

transponibles van más allá de su capacidad de reunir segmentos de ADN no relacionados y trasladar genes entre estos segmentos. Estos elementos pueden también promover la reordenación de la información genética sobre el cromosoma y la delección del material genético. El conocimiento de estos efectos ha surgido de forma más clara a partir del estudio de un peculiar fago, o virus bacteriano, descubierto en 1963 por Austin L. Taylor, de la Universidad de Colorado. Al igual que otros virus bacterianos "temperados", el fago de Taylor podía insertar su ADN en un cromosoma bacteriano, dando lugar a un "profago" en estado latente que coexistía con la bacteria y se transmitía a la descendencia bacteriana al dividirse las células. Sin embargo, a diferencia de otros fagos temperados, éste podía insertarse en muchos puntos del cromosoma, dando lugar así a una gran variedad de mutaciones en la bacteria huésped. En virtud de esta característica, Taylor denominó a su fago Mu, de "mutador".

Los estudios posteriores demostraron que Mu era en realidad un elemento transponible capaz de existir también en forma de virus infeccioso. En la partícula vírica, el ADN de Mu se encuentra entre dos segmentos cortos de ADN bacteriano extraídos del cromosoma de la bacteria. Al infectar una nueva célula, el virus Mu se desprende del viejo ADN bacteriano y se sitúa en un nuevo punto del cromosoma huésped. Ahmad I. Bukhari y sus colegas, del Cold Spring Harbor Laboratory, han demostrado que la capacidad de duplicación de Mu está íntimamente relacionada con su capacidad de transposición; el virus ha evolucionado, aparentemente, de tal forma que su período vital depende de los fenómenos de transposición.

Se estaba aún desentrañando la estructura del ADN de Mu y los pormenores del ciclo vital de los fagos, cuando Michel Faelen y Arianne Toussaint, de la Universidad de Bruselas, efectuaron experimentos genéticos dirigidos hacia la comprensión de la interacción del ADN de Mu con otros ADN en una célula bacteriana. Los resultados de una experimentación realizada a lo largo de casi diez años han demostrado que Mu puede catalizar una gran variedad de reordenaciones cromosómicas. Entre éstas se encuentran la fusión de dos moléculas de ADN distintas que se duplican independientemente ("replicones"), la transposición a plásmidos de segmentos de cromosoma bacteriano, la delección de ADN y la inversión de segmentos del cromosoma. En todas estas reordenaciones parecen intervenir las secuencias de nucleótidos localizadas en los terminales del ADN de Mu. Parece que se requiere también la expresión de un gen de Mu que anteriormente se había demostrado necesario tanto para la transposición como para la duplicación del virus. Los experimentos realizados por Hans-Jorg Reif y Saedler, de la Universidad de Freiburg, y por otros grupos han probado que, al igual que Mu, otros elementos transponibles son capaces de promover la delección del ADN; Nancy E. Kleckner, David Botstein y sus colaboradores en Harvard y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, han demostrado que estos elementos pueden también realizar la inversión de secuencias de ADN. De hecho, hay pruebas de que algunos elementos transponibles participarían más frecuentemente en reordenaciones específicas del ADN que en fenómenos de transposición.

Las nuevas técnicas de determinación de la secuencia nucleotídica del ADN de forma simple y rápida han constituido una óptima herramienta para la elucidación de la estructura de los elementos transponibles, así como del mecanismo bioquímico implicado en la transposición y las reordenaciones cromosómicas. Hisako Ohtsubo y Eiichi Ohtsubo, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, lograron determinar la secuencia completa de un elemento transponible (IS 1). Las observaciones de la secuencia del ADN efectuadas inicialmente por Nigel Grindley, de la Univer-



REPRESENTACION DE UN HIPOTETICO PROCESO molecular que explicara la transposición y las redistribuciones cromosómicas. El ADN donante, que contiene el transposón (*líneas gruesas*), figura en negro, el ADN receptor en color. Las flechas señalan los terminales hidroxílicos 3', los puntos, los terminales fosfato 5'; las letras *A, B, C* y *D* corresponden a determinados segmentos de las dos moléculas de ADN. El proceso consta de cuatro pasos. Comienza con la rotura de un filamento (*1a*) en los finales del elemento transponible y en las terminaciones de la secuencia nucleotídica "diana" (*cuadrados en color*) que sufrirá la duplicación. Las roturas dejan al descubierto (*1b*) los grupos químicos implicados en el siguiente paso: la unión de los filamentos de ADN de las moléculas donante y receptora de suerte que el elemento transponible de doble filamento da lugar a una horquilla de replicación en cada terminación (*2*). Mediante síntesis de ADN (*3*) queda duplicado el transposón (*rectángulo en blanco*) y la secuencia diana (*cuadrados en blanco*), lo que explica la duplicación observada. Este paso forma dos nuevas moléculas de doble filamento; cada copia queda unida a un segmento de la molécula donante y a un segmento entre de la molécula receptora. (Las copias del elemento sirven de lazo de unión para la recombinación entre dos moléculas de ADN no relacionadas.) En el paso final (*4*) la recombinación recíproca entre las copias del elemento transponible resulta en la inserción del elemento en un nuevo locus y regenera la molécula donante. No se conoce el mecanismo de tal recombinación; no requiere proteínas para la homóloga, y, en Tn3, está mediada por secuencias del elemento.

sidad de Yale y la Universidad de Pittsburgh, y por Michele Calos y Lorraine Johnsrud, de Harvard, trabajando junto a Jeffrey Miller, de la Universidad de Ginebra, han arrojado no poca luz sobre el mecanismo de la transposición. Ambos grupos examinaron las secuencias del ADN en los puntos en que, de forma independiente, tenían lugar las inserciones del elemento IS 1. Observaron que la inserción del IS 1 provocaba la duplicación de una secuencia de nueve pares de nucleótidos en el ADN receptor. Las secuencias duplicadas se hallaban a cada lado del elemento de inserción y eran adyacentes a sus terminales duplicados de secuencia invertida. Dado que la secuencia del ADN receptor era distinta en cada uno de los lugares de inserción estudiados, en cada inserción se duplicaban diferentes nucleótidos.

Las comunicaciones posteriores de distintos laboratorios han mostrado que la inserción de otros elementos transponibles provoca también duplicaciones de una corta secuencia de ADN. Ciertos elementos dan lugar a duplicaciones de nueve nucleótidos y otros generan duplicaciones de una longitud de cinco u once nucleótidos. Como señalaron Calos y sus colegas, y también Grindley, las observaciones sugerían que un determinado paso en el proceso de inserción requeriría que, en el lugar de la transposición, se produjera una rotura del ADN. El punto de rotura de un filamento distaría cinco, nueve u once nucleótidos del punto de rotura del otro filamento. El rellenado de los segmentos de filamento simple que seguiría a la descomposición requeriría la síntesis de unos cortos segmentos de filamento simple de ADN complementario, y daría lugar a una duplicación en la secuencia de nucleótidos. Faelen y Toussaint han llegado también a la conclusión de que durante el proceso de reorganización cromosómica efectuado por Mu se requiere la síntesis de ADN: apreciaron que el cromosoma bacteriano reorganizado presentaba a menudo dos copias del profago, la forma insertada de Mu.

En base a estas observaciones, uno de nosotros (Shapiro) propuso un modelo que explicaba la transposición, las reordenaciones cromosómicas y la duplicación de los elementos transponibles, como el fago Mu, en forma de variaciones de un único proceso bioquímico secuencial. La secuencia es de tal forma que los elementos transponibles pueden realizar dos funciones durante la reorganización estructural del ADN celular: se duplican a sí mismos permaneciendo insertados en el cromosoma bacteriano y reúnen segmentos de ADN cromosó-

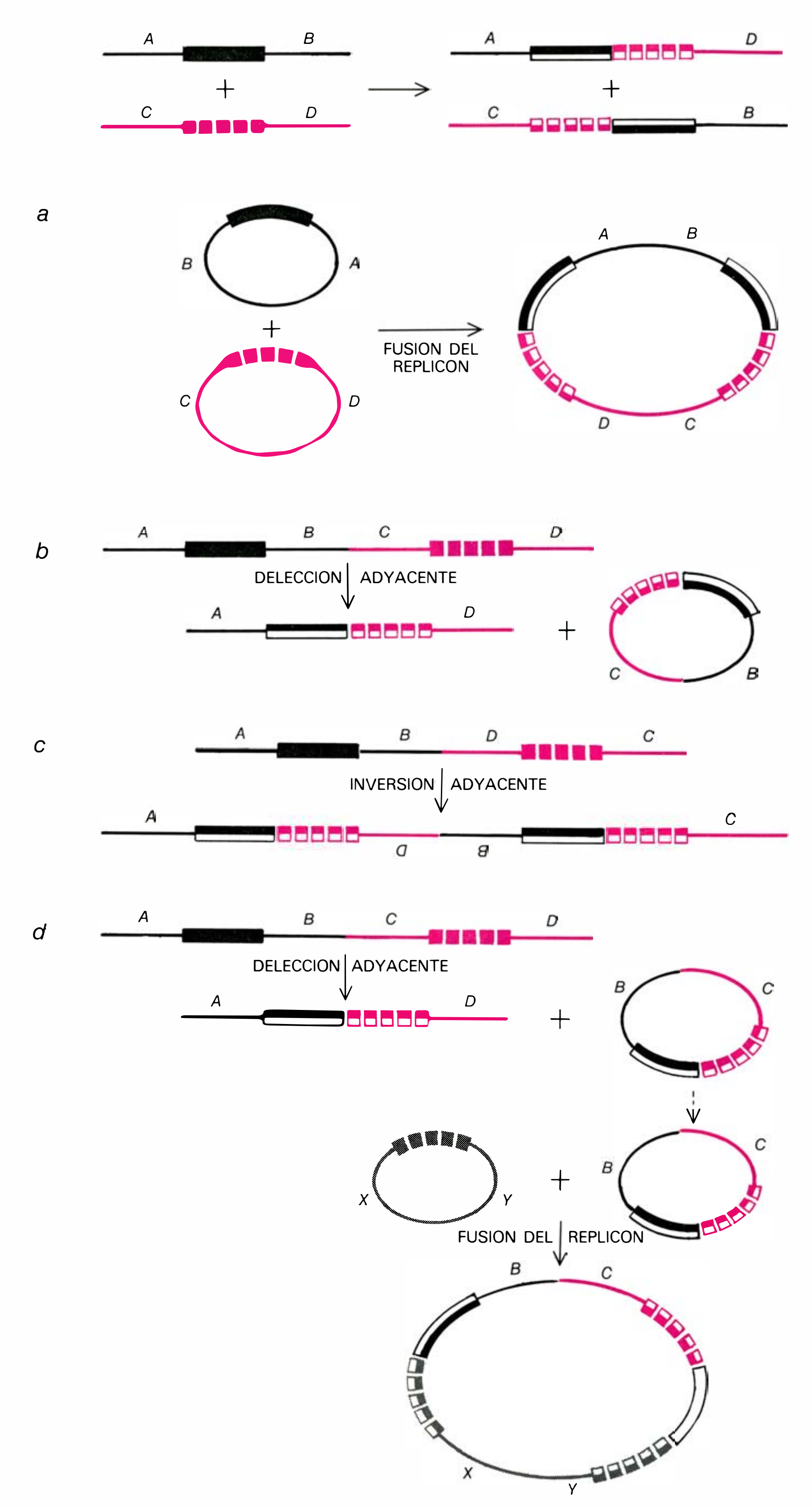
mico no relacionados, dando lugar a una gran diversidad de reorganizaciones estructurales, entre las que se encuentran fusiones, delecciones, inversiones y transposiciones.

Si este modelo tiene verdaderamente algún parecido con la realidad de los hechos, entonces los fenómenos de recombinación no homóloga asociados a los elementos transponibles difieren bastante de otros tipos de recombinación ilegítima, como la integración del ADN del fago lambda en el cromosoma bacteriano, donde no está involucrada la síntesis de ADN. Es probable que se descubra que las bacterias poseen diversos mecanismos para llevar a cabo la recombinación no homóloga, de la misma forma que disponen de varias vias para efectuar la recombinación homóloga.

Es importante tener presente la capacidad de desarrollar mecanismos múltiples de recombinación ilegítima al comparar los fenómenos que parecen ser similares en bacterias y en células superiores. Los fenómenos de transposición, genéticamente análogos, podrían no ser similares desde un punto de vista bioquímico. Ciertas pruebas genéticas indican que el movimiento de elementos controladores en maíz podría desarrollarse mediante un mecanismo distinto del proceso de la transposición en bacterias.

Las reordenaciones genéticas pueden tener una importancia biológica en dos escalas temporales: la escala evolutiva, donde los efectos de la reorganización se aprecian al cabo de muchas generaciones, y la escala temporal del desarrollo, donde los efectos se evidencian en una sola generación. Es sabido que los elementos genéticos transponibles pueden servir a modo de interruptores biológicos que ponen en marcha o detienen los genes, como resultado de su inserción en lugares específicos. En algunos casos la inserción de un elemento IS con una determinada orientación suspende el funcionamiento de los genes próximos, mientras que su inserción con la orientación opuesta puede activar genes que antes no se expresaban.

Una regulación análoga de la expresión génica mediante la reorganización cromosómica es la "variación de fase", observable en ciertas bacterias patológicas que pueden invadir el tracto gastrointestinal. La fase, o especificidad inmunológica, de un flagelo piliforme de estas bacterias puede cambiar bruscamente al cabo de una sola generación bacteriana. Melvin Simon, de la Universidad de California en San Diego, y sus colegas han demostrado recientemente que la decisión entre la expresión de un



PRIMEROS TRES PASOS del proceso, resumidos esquemáticamente en la parte superior de la ilustración. Estos pasos dan lugar a la recombinación entre moléculas de ADN no relacionadas y explican todas las redistribuciones mostradas en la ilustración de la página 22 de la siguiente manera: si las moléculas donante y receptora son circulares, los tres pasos dan lugar a la fusión del replicón (*a*). Si las regiones donante y receptora forman parte de una sola molécula, el proceso genera una delección adyacente (*b*) o una inversión adyacente, dependiendo de la posición de las regiones *A, B, C* y *D*. Dos procesos sucesivos (fusión del replicón tras delección) pueden dar lugar a la transposición de un segmento de ADN adyacente al elemento transponible, junto con dos copias del elemento (*d y abajo*).

gen flagelar de *Salmonella* o la de su alternativa, que especifica una fase distinta, está controlada por la inversión de un determinado segmento del cromosoma bacteriano. La inversión tiene lugar en ausencia de proteínas requeridas en la recombinación homóloga, por lo que parece depender de enzimas de recombinación que reconocen las terminaciones del segmento invertible. Queda por determinar si el mecanismo de conmutación responsable de las variaciones de fase opera mediante un proceso molecular análogo al de la transposición, aunque el proceso puede incluirse sin duda dentro de la categoría de los fenómenos recombinatorios que hace unos años se consideraron "ilegítimos".

Aunque hasta ahora los estudios moleculares sobre elementos transponibles se han llevado a cabo principalmente en bacterias, hace años que se tienen pruebas genéticas de la existencia de elementos similares en organismos superiores. La obra pionera de Barbara McClintock no sólo probó la existencia de elementos genéticos transponibles en el maíz sino que también demostró mediante análisis genético que el movimiento de un elemento controlador de un punto a otro del cromosoma del maíz dependía de la acción de determinados genes localizados en los mismos elementos, genes presumiblemente análogos a los que codifican para las transposasas de los elementos Tn y del fago Mu. McClintock demostró también que ciertos elementos controladores (denominados reguladores) gobiernan la expresión de genes distantes portadores de inserciones de otros elementos de control (denominados receptores). Los grupos de genes se expresan sincrónicamente en determinados momentos del desarrollo del vegetal; McClintock sugirió que la transposición de los elementos receptores podría proporcionar un mecanismo para la rápida evolución de los mecanismos de control en situaciones en las que varios genes debieran ser activados y desactivados al mismo tiempo, como sucede en el transcurso del desarrollo.

Como a menudo ocurre en la ciencia, la significación de la obra de McClintock no se comprendió ni apreció hasta que estudios posteriores realizados en los sistemas bacterianos, mucho más simples, proporcionaron una prueba física de la existencia de secuencias de inserción y de transposones en forma de segmentos discretos de ADN, y demostraron que la transposición se realizaba a través de un mecanismo distinto del de los procesos recombinatorios conocidos hasta entonces. Actualmente se sabe de muchos otros casos de elementos transponibles en organismos superiores, como en la mosca de la fruta *Drosophila* y en la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Se está investigando activamente el posible papel de estos elementos en la generación de reordenaciones cromosómicas. Los recientes trabajos sobre el control de la síntesis de inmunoglobulina en ratones efectuados por Susumu Tonegawa y sus colaboradores, en el Instituto de Inmunología de Basilea, han demostrado que la capacidad de las células de mamíferos de producir moléculas de anticuerpos específicas en respuesta a proteínas extrañas inyectadas implica también reordenaciones cromosómicas. No hay duda de que pronto se conocerán más casos en los que los fenómenos de recombinación ilegítima desempeñan un papel fundamental en la expresión de los genes en el transcurso de la diferenciación celular.

También en bacterias queda aún mucho por conocer acerca de los mecanismos moleculares básicos que llevan a cabo la transposición de elementos genéticos y la reordenación de las moléculas de ADN que va asociada a ella. Deben todavía definirse con mayor precisión los distintos pasos bioquímicos del proceso de transposición. ¿Cuál es el mecanismo de reconocimiento de los terminales duplicados de secuencia invertida de los elementos transponibles? ¿Qué proteínas, además de las codificadas por el transposón, intervienen en la transposición? ¿Cuáles son los aspectos genéticos adicionales de la regulación de la transposición? En un sentido más amplio, ¿cuál es el papel de la recombinación ilegítima en la organización y expresión de los genes, no sólo en bacterias sino también en organismos superiores? Aun cuando los mecanismos estudiados en las bacterias proporcionan un modelo de trabajo para los mecanismos de fenómenos similares que tienen lugar en organismos superiores, los paralelismos serán, a buen seguro, incompletos.

Está claro que la reunión de segmentos de ADN estructural y ancestralmente diferentes, mediante elementos transponibles, es de gran importancia para la producción de diversidad genética y para la evolución de los sistemas biológicos. El descubrimiento de un proceso recombinatorio tan radicalmente distinto en un momento en el que muchos biólogos moleculares creían entender casi todos los aspectos importantes de la genética bacteriana, quedando sólo por aclarar los detalles de casos particulares, le lleva a uno a preguntarse si todavía esperan su descubrimiento procesos biológicos esencialmente nuevos y de gran trascendencia.

La escritura zapoteca

La cultura zapoteca figura entre las altas culturas de México anteriores a la conquista española. Sus jeroglifos, la mayoría de ellos esculpidos entre 500 a.C. y 700 d.C., nos informan del ascenso y decadencia del estado zapoteca

Joyce Marcus

Las civilizaciones de Mesoamérica –la región desde México hacia el sur hasta Guatemala y Honduras– fueron únicas entre las culturas precolombinas del Nuevo Mundo en cuanto a poseer una verdadera forma de escritura: una serie de jeroglifos dispuestos en columnas verticales y en muchos casos combinados con numerales. Los glifos estaban asociados, al menos indirectamente, con una lengua hablada. Aunque hubo muchas variaciones regionales, los cuatro sistemas principales fueron los correspondientes a los mayas del sur de México, Belice, Guatemala y Honduras, los aztecas de México central y los mixtecas y zapotecas del suroeste de México.

El zapoteca fue el más antiguo de los cuatro sistemas. Apareció quizás en una fecha tan temprana como 600 a.C. en el Valle de Oaxaca, a unos 550 kilómetros al sur de la ciudad de México. El sistema zapoteca es también el menos estudiado de los cuatro, por lo que se desconoce todavía su relación evolutiva con las escrituras posteriores de los mayas, aztecas y mixtecas. La escritura zapoteca temprana se encuentra principalmente en forma de inscripciones en monumentos de piedra y en pinturas sobre las paredes de tumbas en el Valle de Oaxaca. Si pudieran descifrarse las inscripciones, éstas se podrían combinar con la información arqueológica existente para cubrir parte de la historia del pueblo zapoteca no recogida de otro modo.

Teniendo en cuenta esta posibilidad, he estado trabajando desde 1972 con el fin de registrar las inscripciones en piedra que en número superior a 500 se han encontrado en el Valle de Oaxaca y situarlas dentro de un contexto. Mi investigación se ha realizado sobre la base del trabajo pionero de dos arqueólogos mexicanos, Alfonso Caso y Andrade e Ignacio Bernal, y se ha integrado con la obra reciente de dos colegas en los Estados Unidos: Richard E. Blanton, de Purdue University, que ha llevado a cabo un análisis de la antigua capital zapoteca, Monte Albán, como área urbana; y de Kent V. Flannery, de la Universidad de Michigan, que está estudiando la secuencia de los asentamientos en el Valle de Oaxaca que precedieron a la fundación de Monte Albán.

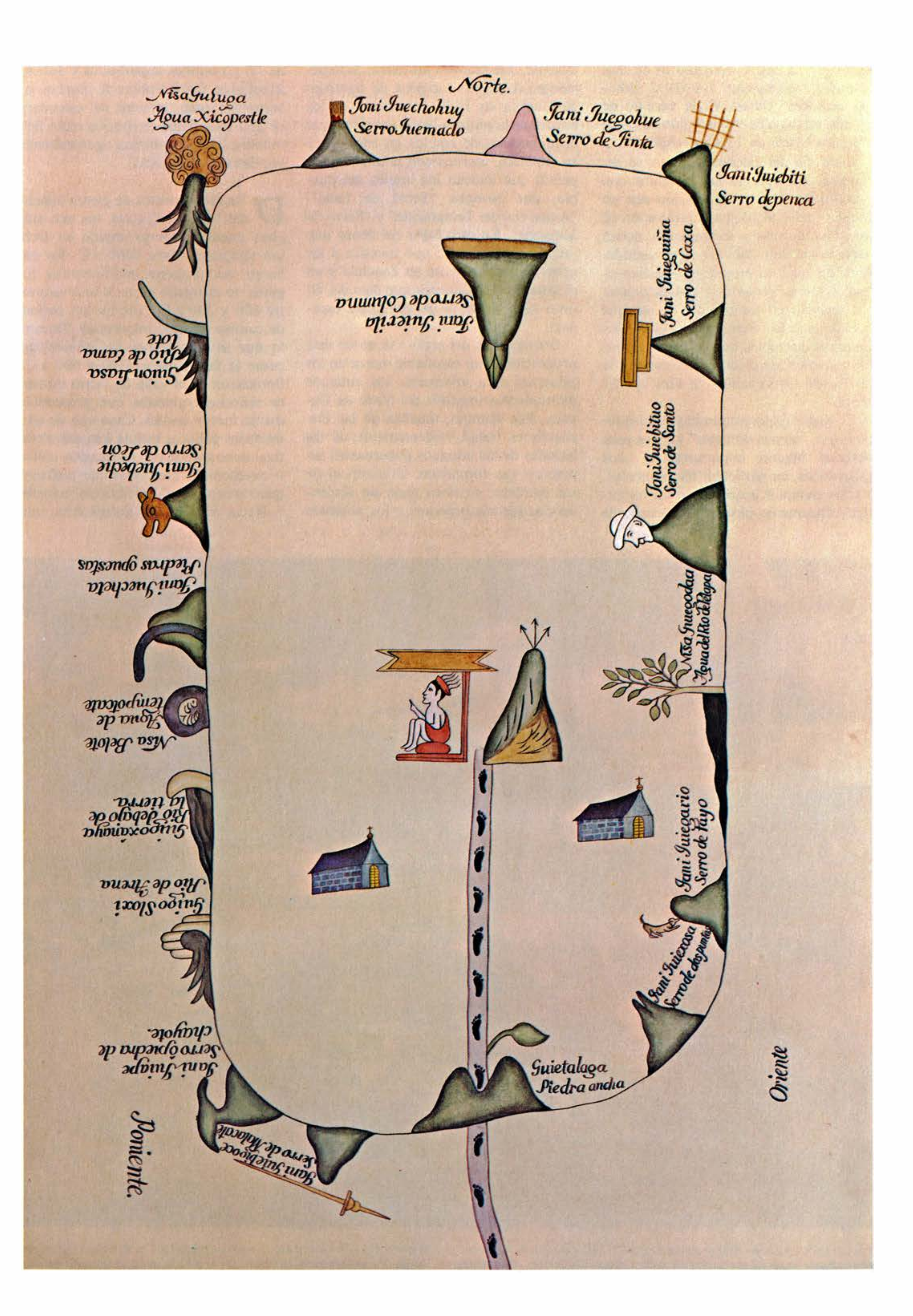
Varios estudios anteriores de la escritura zapoteca han pretendido interpretar las inscripciones no en sí mismas, sino en relación con las escrituras mejor conocidas de los aztecas, los mixtecas y los mayas. Esto es lamentable; aunque los cuatro sistemas comparten algunos elementos comunes, las lenguas que dichos sistemas representan pertenecen a tres familias diferentes: la lenguas zapoteca y mixteca pertenecen a la familia otomangue, la lengua azteca a la utoazteca, y la maya a la macro-maya. Asignar nombres mayas, aztecas o mixtecas a los glifos zapotecas contribuye poco a una mejor comprensión. Verdaderamente, en algunos casos sólo sirve para obscurecer las interesantes y significativas diferencias entre los cuatro sistemas de escritura.

He seleccionado para mi marco interpretativo los extensos documentos que tratan del pueblo zapoteca y que fueron recopilados por los conquistadores españoles a finales del siglo XVI. Estos documentos incluyen descripciones del calendario zapoteca, la organización política y la religión zapotecas y la gramática y el vocabulario de la lengua zapoteca. Escribas zapotecas, a instancia de los españoles, escribieron también genealogías y prepararon mapas regionales. En el presente trabajo intentaré trazar la evolución de la escritura zapoteca y de reconstruir simultáneamente la historia política zapoteca. Para ello combinaré la información procedente de los documentos históricos con lo que se sabe de las convenciones compartidas por los cuatro sistemas escriturarios mesoamericanos y con el testimonio arqueológico de Oaxaca, en particular los monumentos con inscripciones.

La sociedad zapoteca estaba dividida en el siglo XVI en dos clases, cuyos miembros no se casaban entre sí. El estrato superior lo formaban los gobernantes hereditarios (*coqui*) y sus familias, junto con nobles menores (*xoana*). El estrato inferior lo constituían el pueblo llano y los esclavos. Se prestaba gran atención al orden de nacimiento de los niños nobles: los gobernantes se reclutaban frecuentemente entre los hijos mayores y los sacerdotes entre los más jóvenes. Las campañas militares las realizaban los oficiales nobles al mando de soldados plebeyos. Los nobles formaban con frecuencia alianzas por medio del matrimonio con familias de la élite de otras comunidades; los plebeyos generalmente se casaban dentro de sus aldeas. Se veneraba a los ancestros reales y se consideraba que tenían bastante poder sobrenatural en los asuntos que afectaban a sus descendientes.

Los zapotecas del siglo XVI seguían dos calendarios, uno secular y otro ritual. El calendario secular de 365 días (*yza*) estaba dividido en 18 "lunas" de 20 días más un período de cinco días. El calendario ritual de 260 días (*pije* o *piye*)

PINTURA ZAPOTECA en la página opuesta, preparada a instancia española 19 años después de la conquista de México; muestra los límites de las tierras pertenecientes al municipio de Santiago de Guevea como un óvalo con 18 topónimos: signos de lugar jeroglíficos para indicar importantes hitos geográficos. Junto a cada signo aparecen dos traducciones. La primera es el nombre del hito en la lengua hablada zapoteca, escrita con el alfabeto español; la segunda es el equivalente en español. Sirvan de ejemplos, "Serro de Dos Puntas (*en la posición de las cinco en punto del reloj*), "Serro de Malacate" (*a la izquierda de las seis en punto*), "Agua [Río] de Tempotcate" (*debajo de las nueve*), y "Serro de León" (*encima de las nueve*). El gobernante zapoteca de Santiago de Guevea aparece sentado en un templo cerca del centro del óvalo. La pintura original, hecha en 1540, se copió en 1820; esa copia, en la que se basa esta pintura, se conserva ahora en el Museo Nacional de Antropología de México.



Norte.
Nisa Guluga
Agua Xicopestle
Joni Juechohuy
Serro Juemado
Jani Juegohue
Serro de Tinta
Jani Juiebiti
Serro depenca
Jani Jueguiña
Serro de Caxa
Jani Juiezila
Serro de Columna
Rio de cama
lote
Jani Juebedie
Serro de Leon
Piedras opuestas
Nisa Belote
Agua de
tempolcate
Rio debajo de
la tierra
Rio de Arena
Serro opedra de
chaijote
Serro de Malacate
Guietalaga
Piedra ancha
Jani Juiegario
Serro de Rayo
Serro de dos puntas
Oriente
Poniente.

se dividía en cuatro unidades de 65 días llamadas "relámpagos" (*cocijo*) o "grandes espíritus" (*pitào*). Cada período de 65 días estaba a su vez dividido en cinco períodos (*cocii*) de 13 días (*chij*).

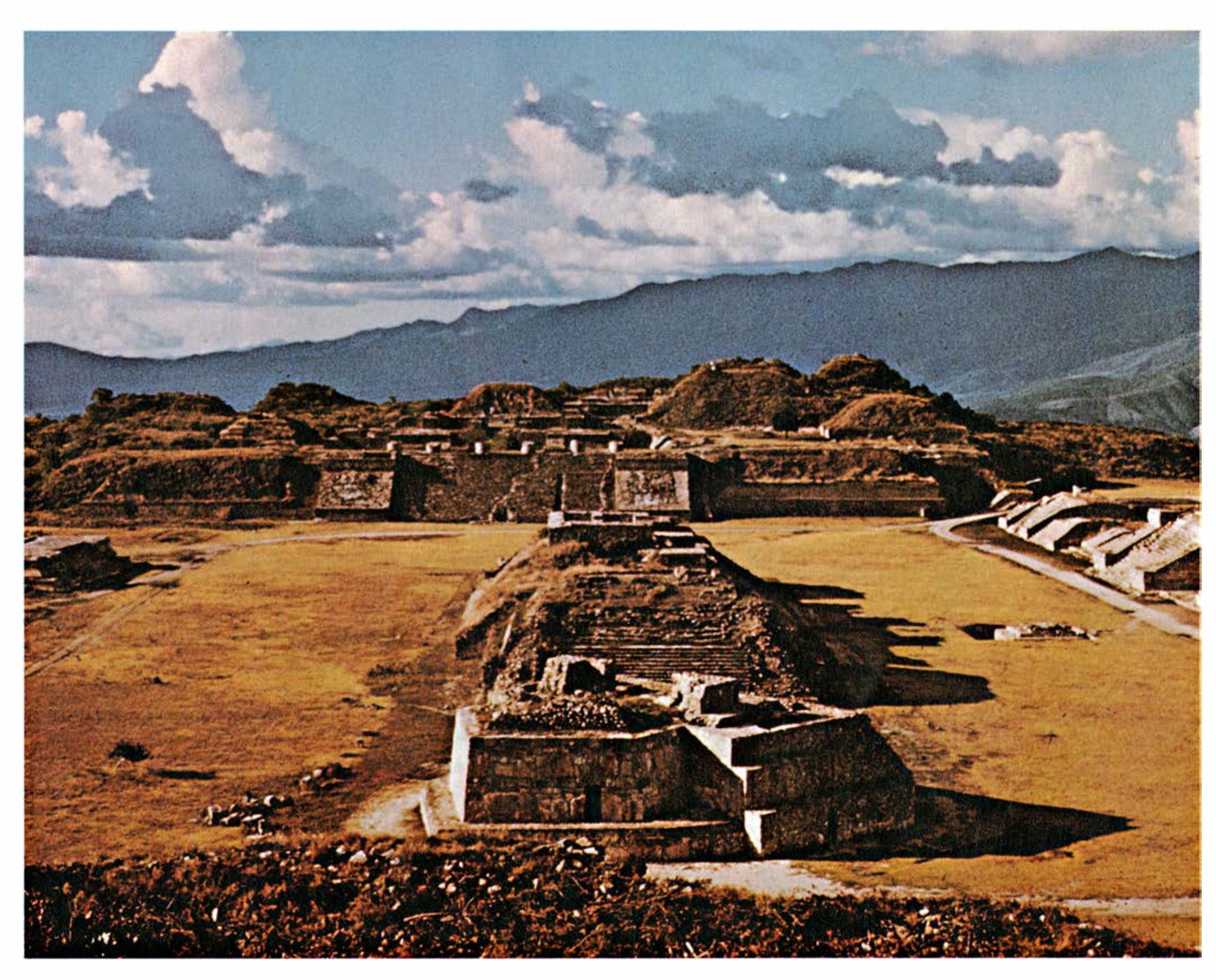
Cada día del calendario ritual se designaba con uno de los 20 glifos con nombre de día en combinación con un número del 1 al 13. La combinación de los glifos de días y los números daban lugar a los 260 días del ciclo sagrado. Cada día tenía su propia significación ritual, y los gobernantes y nobles zapotecas recibían el nombre del día en que habían nacido. Son típicos entre los nombres de nobles que aparecen en los monumentos de piedra zapotecas los de "1 Tigre", "8 Venado", "5 Flor" y "11 Mono".

El pueblo zapoteca también utilizó topónimos, "signos de lugar" glíficos para designar lugares importantes o hitos geográficos, en particular las montañas. Varios ejemplos aparecen en un importante documento pictórico, el Lienzo de Guevea, que muestra las tierras pertenecientes al pueblo zapoteca de Santiago de Guevea en 1540. Alrededor de los bordes de la pintura hay signos de lugar acompañados de rótulos en español (y en zapoteca, escritos con el alfabeto español) que indican los límites del pueblo; por ejemplo, "Serro de León", "Agua/río/del Tempotcate" y "Serro de Malacate". En otro lugar del lienzo hay una lista genealógica que muestra a los gobernantes zapotecas en Zaachila y en el istmo de Tehuantepec que data del último siglo antes de la conquista española.

Documentos del siglo XVI como éste proporcionan un razonable marco en los esfuerzos para interpretar los antiguos monumentos inscritos del Valle de Oaxaca. Por ejemplo, muchas de las inscripciones tratan evidentemente de las hazañas de los antiguos gobernantes zapotecas: sus conquistas, el sacrificio de sus cautivos, su línea regia de descendencia, sus matrimonios y los nombres de sus posesiones importantes y distritos tributarios. Los nombres de muchos gobernantes están tomados del calendario de 260 días, y los territorios están delimitados por topónimos, generalmente nombres de montañas.

De los monumentos de piedra tallados del Valle de Oaxaca, los más antiguos pueden haberse erigido en fecha tan temprana como 1000 a.C. Sin embargo, los primeros monumentos con glifos no aparecen hasta el intervalo entre 600 y 200 a.C., que fue un período de cambio político importante. Durante lo que se conoce por los arqueólogos como la fase Rosario (700 a 500 a.C.), florecieron en el valle un cierto número de señoríos regionales que presumiblemente fueron rivales. Cada una de estas unidades políticas incluía una aldea relativamente grande con estructuras cívicas o ceremoniales y caseríos más pequeños que carecían de tales edificios públicos.

Hacia 500 a.C. desaparecieron mu-



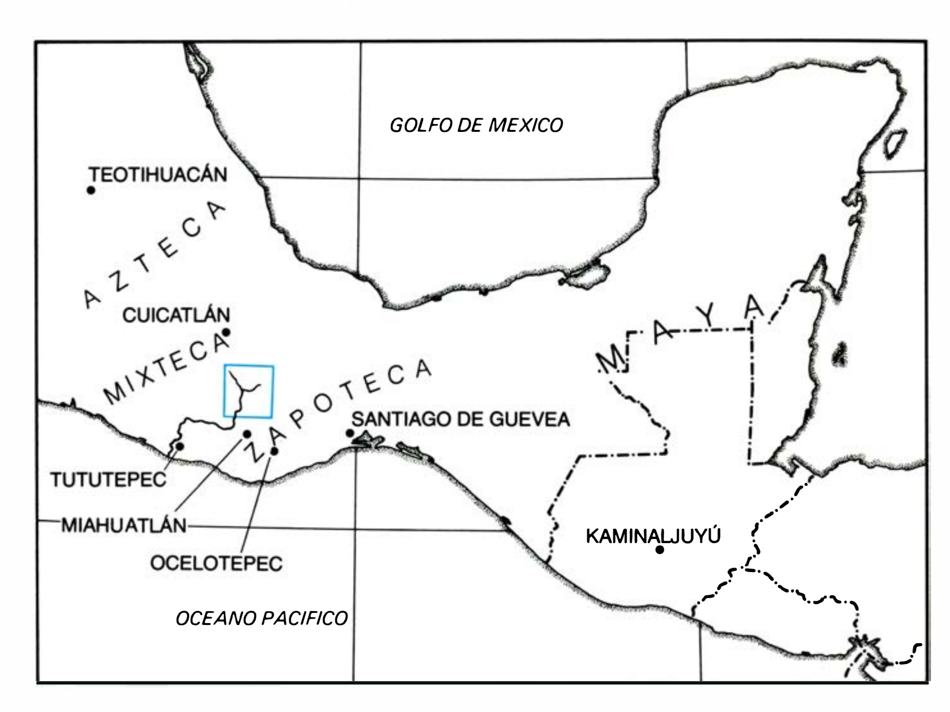
LA GRAN PLAZA de Monte Albán domina el más céntrico de los cinco cerros donde se levantaba la ciudad; mide 150 por 300 metros. En primer término se ve la Estructura J, construida durante el Período II de Monte Albán. En sus muros se exhiben más de 40 "losas de conquista" inscritas.

chos de estos señoríos del valle o se vieron grandemente reducidos, fundándose un nuevo tipo de comunidad. La nueva comunidad estaba en la cumbre de Monte Albán, una elevación cerca del centro del valle que alcanza unos 400 metros sobre el fondo del propio valle. El estudio de Blanton muestra que la comunidad, con mucho la más grande del valle, estaba inicialmente dividida por lo menos en tres áreas residenciales separadas. La disposición sugiere que la nueva plaza fuerte pudo haber sido fundada por grupos anteriormente rivales que se habían unido en alguna forma de confederación zapoteca.

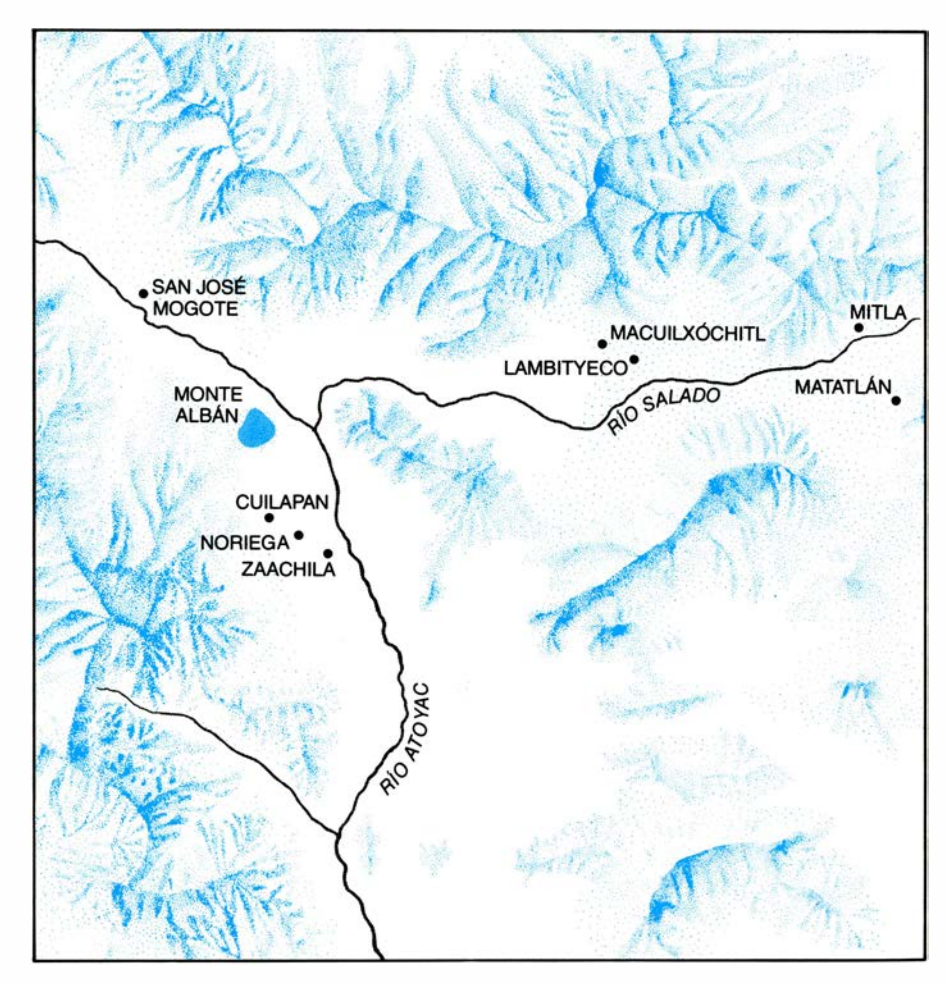
Durante la fase inicial de asentamiento, período Monte Albán I (500 a 200 a.C), los ocupantes de la cumbre levantaron tres kilómetros de murallas defensivas. La mayor parte de esta actividad constructora se realizó al final del período. Al mismo tiempo los habitantes tallaron más de 300 monumentos de piedra, el número más grande que se conoce en cualquier yacimiento arqueológico de Mesoamérica. En ninguno de los períodos posteriores de Monte Albán se erigió ni una cuarta parte de esta cifra. Los monumentos del Período I, en consonancia con las murallas defensivas de los pobladores, expresaban principalmente temas militares.

Entre los motivos convencionales compartidos por la iconografía mesoamericana algunos de los más extendidos son los que representan cautivos. Los prisioneros se muestran en situación humillante, desnudos y atados, y sus posturas son torpes y distorsionadas. En contraste, sus captores aparecen vestidos con elegante indumentaria y en posición de rígida dignidad. Si un prisionero ha sido sacrificado se le muestra con los ojos cerrados y la boca abierta y, en muchos casos, con volutas floridas, probablemente representando sangre, que salen de sus heridas. Para dar un ejemplo, los mayas construyeron muchas galerías abiertas donde aparecían los prisioneros de esta forma; las tallas se situaron en escalinatas de tal manera que los vencedores podían figuradamente "pisar sobre los cuerpos" de los conquistados cuando se acercaban al edificio que había al final de los escalones, usualmente un templo. Los aztecas construyeron instalaciones que tenían un propósito similar: el *tzompantli*, especie de empalizada formada por las calaveras de los enemigos muertos.

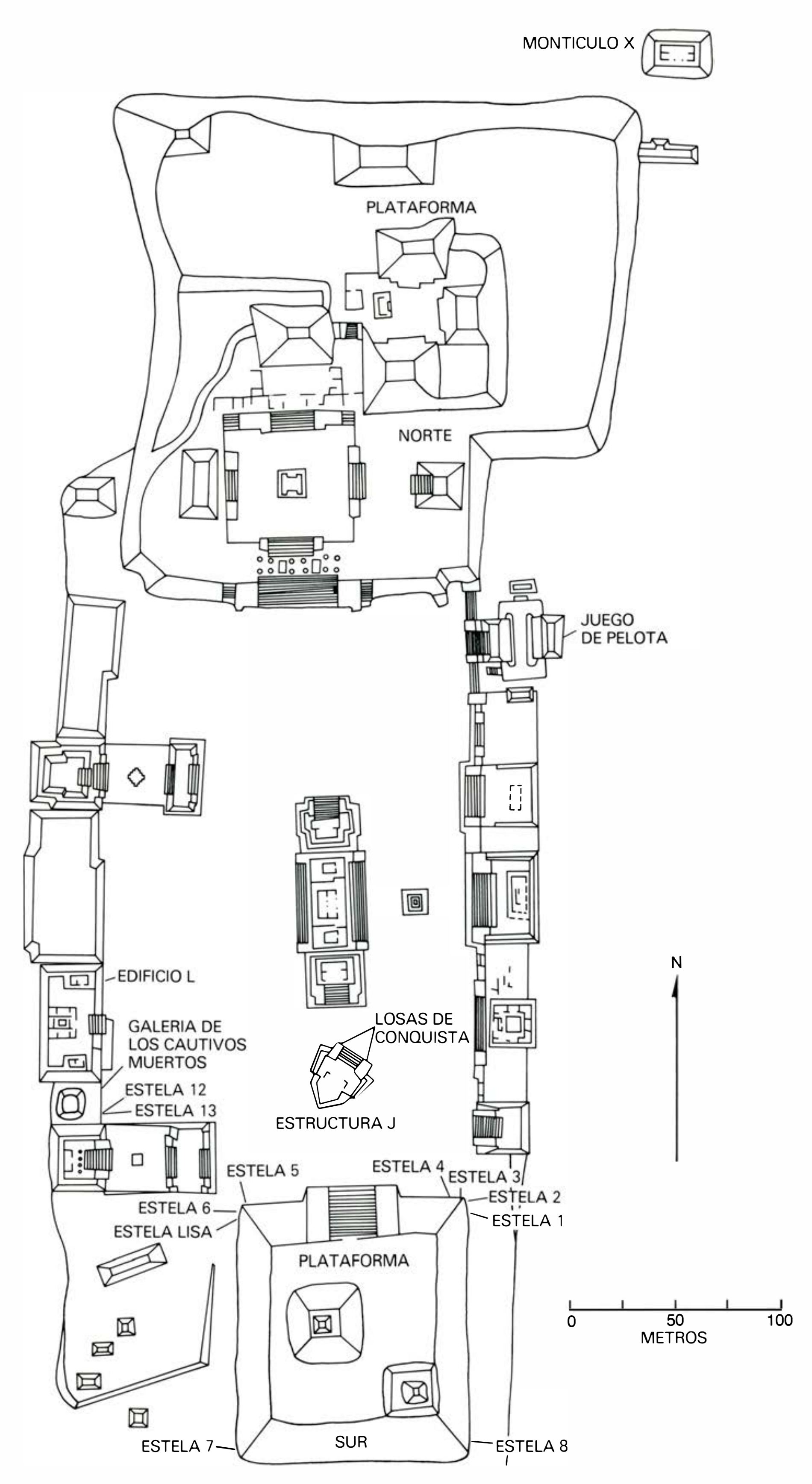
La talla zapoteca más antigua que se conoce representando este tema convencional se encontró a unos 15 kilómetros al norte de Monte Albán, en San José Mogote, un gran centro cívico y cere-



LOS CUATRO SISTEMAS PRINCIPALES de escritura jeroglífica en el Nuevo Mundo precolombino fueron los de los mayas del este de México, Guatemala, Belice, Honduras y partes de El Salvador; el de los aztecas de México central y el de los mixtecas y zapotecas del suroeste de México. La influencia de la ciudad mexicana de Teotihuacán se extendió por lo menos hasta Kaminaljuyú en terreno guatemalteco. El Valle de Oaxaca, dentro del rectángulo, aparece en detalle en la ilustración inferior.



VALLE DE OAXACA, centrado en la confluencia del Río Atoyac y el Río Salado en la Sierra Madre del Sur. Fue la cuna de la civilización zapoteca. Desde poco después del 500 a.C. hasta el 700 de nuestra era, Monte Albán (*color*) fue la capital del valle que entonces estaba unificado. Antes y después de ese período los asentamientos separados del valle eran independientes. En tiempos tardíos, sus gobernantes, celosos de su herencia real, realizaron alianzas por medio del matrimonio entre ellos.



PLANO DE LA GRAN PLAZA de Monte Albán, donde se muestra la localización de las dos exhibiciones monumentales principales: la galería de los cautivos muertos, a lo largo de la cara oriental del Edificio L, y las cuarenta y tantas losas de conquista de la Estructura J. De las estelas también señaladas en el plano, las números 12 y 13, próximas a la galería de los cautivos, presentan el "texto" zapoteca más antiguo. Cuatro de las nueve estelas en las esquinas de la Plataforma Sur (*Números 1, 8, 7 y la estela lisa, según el sentido de las agujas del reloj*) describen una visita de personajes procedentes de Teotihuacán. Este tipo de contacto también se indica en un monumento hallado en el Montículo X. Las estelas aparecen donde primeramente se encontraron y no donde están situadas ahora. El Edificio L se construyó durante el Período Monte Albán I (500 al 200 a.C.) y la Estructura J durante el Período II (200 a.C. al 100 d.C.). Las plataformas norte y sur se construyeron en el Período III (100-600 d.C.).

monial perteneciente a la fase Rosario. Conocido como monumento Núm. 3, representa una figura humana desnuda y en una postura como desmadejada. Entre las piernas de la figura se ve un punto decorado (indicando el numeral 1) acompañado del glifo zapoteca *xoo*, que significa "temblor de tierra" o "movimiento". La inscripción es la prueba más antigua que se conoce de la existencia del calendario zapoteca de 260 días; puede que señale el nombre del individuo. Como San José Mogote parece haber sido prácticamente abandonado al final de la fase Rosario, presumiblemente como parte de la fundación de Monte Albán, el monumento Núm. 3 fue probablemente construido entre 700 y 500 a.C.

El escenario de Monte Albán lo constituyen cinco cerros conectados entre sí y el asentamiento humano cubre un área de 6,5 kilómetros cuadrados. Una cumbre central la ocupa la Gran Plaza que mide 150 por 300 metros. Sus estructuras principales son la Plataforma Norte, que comprendía la residencia real y los templos de la nobleza zapoteca, la Plataforma Sur, que contenía otros templos, un gran juego de pelota a lo largo del lado oriental de la plaza y una serie de palacios y templos periféricos. El Montículo X, un templo, se sitúa al noreste de la Gran Plaza. El Edificio L, una estructura que es importante para nuestro análisis, se levanta en la esquina suroeste de la plaza. Estas diversas estructuras se construyeron y reconstruyeron en fechas diferentes. Por ejemplo, el Edificio L se erigió durante el Período I, cuando la población de Monte Albán era al menos de 10.000 habitantes. Las dos plataformas y el juego de pelota se construyeron durante períodos posteriores.

Por ser uno de los primeros edificios públicos levantados por los fundadores de Monte Albán, el Edificio L permanece parcialmente destruido y enterrado bajo capas de construcción zapoteca más tardía hasta 1931, cuando sus macizos restos fueron descubiertos por los arqueólogos que trabajaban en el yacimiento. El edificio fue despejado entre 1931 y 1936; las fotografías y dibujos que se hicieron entonces, junto con las partes que sobreviven de la estructura, indican todos ellos que la cara oriental del Edificio L representaba una gran galería de figuras de piedra dispuestas en cuatro filas y que probablemente se contaban por centenares. Cada una de las figuras era un cuerpo humano grotescamente extendido y desnudo y con los ojos cerrados. Algunas de las figuras te-

nían volutas que salían de una o más heridas.

En la más baja de las cuatro filas cada figura estaba en posición vertical y mirando a la derecha. En la segunda fila las figuras estaban dispuestas horizontalmente; en la tercera fila, las figuras aparecían nuevamente en posición vertical, pero mirando hacia la izquierda; en la fila superior, de nuevo aparecían dispuestas horizontalmente. Las figuras de la fila inferior, las más próximas a los observadores, eran las esculpidas con más detalle. Muchas estaban adornadas con collares, orejeras y complicados peinados; también eran frecuentes los glifos de nombre. Las figuras de la fila superior, las más alejadas, eran las menos decoradas.

Durante casi un siglo estas figuras de Monte Albán han sido objeto de casi toda interpretación concebible. Algunas de ellas, desplazadas del Edificio L, pertenecían a las primeras esculturas encontradas en el yacimiento. Los investigadores las han llamado "danzantes", "nadadores", "sacerdotes en éxtasis" e incluso "anomalías médicas". En verdad, al edificio L todavía se le llama con frecuencia Los Danzantes. En 1962, Michael D. Coe, de la Universidad de Yale, que está familiarizado con la iconografía de las representaciones de prisioneros en toda Mesoamérica, identificó a los "danzantes" del Edificio L como cautivos muertos o ritualmente sacrificados. A esta interpretación habría llegado antes si el Edificio L hubiera permanecido intacto. Con bastante anterioridad a la conquista española, no obstante, la estructura había sido parcialmente destruida y los habitantes de Monte Albán utilizaron posteriormente más de 100 de estas figuras como material para los edificios de la plaza y de otros lugares.

Se han realizado intentos de colocar las figuras en orden cronológico sobre la base del estilo de las tallas, el grado creciente de elaboración, etcétera. En mi opinión, el testimonio arqueológico disponible sugiere que todas las figuras se esculpieron aproximadamente al mismo tiempo y fueron colocadas originalmente en la posición en que las he descrito, apareciendo las figuras trabajadas con más detalles en las filas inferiores. El despliegue, según resultaba originalmente, debe haber sido una de las obras más impresionantes de propaganda militar de toda Mesoamérica.

Las figuras no fueron necesariamente los únicos elementos de tal exhibición. En el extremo sur de la galería del Edificio L hay dos piedras esculpidas. Conocidas como Estela Núm. 12 y Estela Núm. 13, contienen uno de los textos glíficos más antiguos que se conocen en Monte Albán. Aunque la relación exacta de las estelas con la galería no se ha resuelto nunca, algunas de las fotografías hechas en la década de 1930 muestran las piedras situadas tan juntas que casi ciertamente formaron alguna vez una sola inscripción a dos columnas.

En la inscripción aparecen tanto glifos calendáricos como no calendáricos. De los glifos calendáricos algunos parecen ser signos de días y otros son posiblemente signos de meses. Un ejemplo de un posible glifo con el signo de un mes es el último de la segunda columna [*véase la ilustración de la página 36*]. Este glifo aparece en monumentos de otros lugares de Monte Albán en asociación con números superiores a 13. (En el calendario de 260 días ningún signo



UN PRISIONERO SACRIFICADO aparece en el monumento Núm. 3 de San José Mogote, un yacimiento al norte de Monte Albán. El monumento se construyó probablemente entre 700 y 500 a.C. El ojo cerrado, la boca abierta y las "volutas" de sangre que brotan del pecho significan que está muerto. Entre sus piernas aparecen (*color*) un punto ornamentado (representando al numeral 1) y un glifo que significa "temblor de tierra". La doble inscripción puede indicar el nombre del prisionero.

de día puede asociarse con un número superior a 13, pero los signos de mes del calendario secular pueden asociarse con números que lleguen hasta el 19.) Uno de los glifos calendáricos es un signo de año; dentro del espacio en relieve que lo rodea aparece lo que se conoce como un portador de año.

Los glifos no calendáricos de las dos estelas están como emparedados entre dos glifos calendáricos. Los terceros glifos de la parte superior parecen ser materias de frases o cláusulas. Los segundos glifos contando desde arriba representan evidentemente partes de manos. Estos glifos se conocen como composiciones de manos. En los sistemas escriturarios maya y azteca, tales representaciones de manos son partes de verbos: las composiciones de manos zapotecas de Monte Albán pueden ser verbos de acción.

El análisis urbanístico de Blanton ha mostrado que, durante el Período II de Monte Albán (200 a.C. a 100 d.C.), la población del lugar creció hasta aproximadamente 20.000 habitantes. Los pobladores permanecieron refugiados detrás del muro de tres kilómetros, el cual se elevaba hasta cuatro metros a lo largo de las laderas más suaves del norte y del oeste del yacimiento. Durante este período, el estado zapoteca también extendió su influencia política, económica y militar más allá de los límites del Valle de Oaxaca, alcanzando territorios que habían sido anteriormente autónomos.

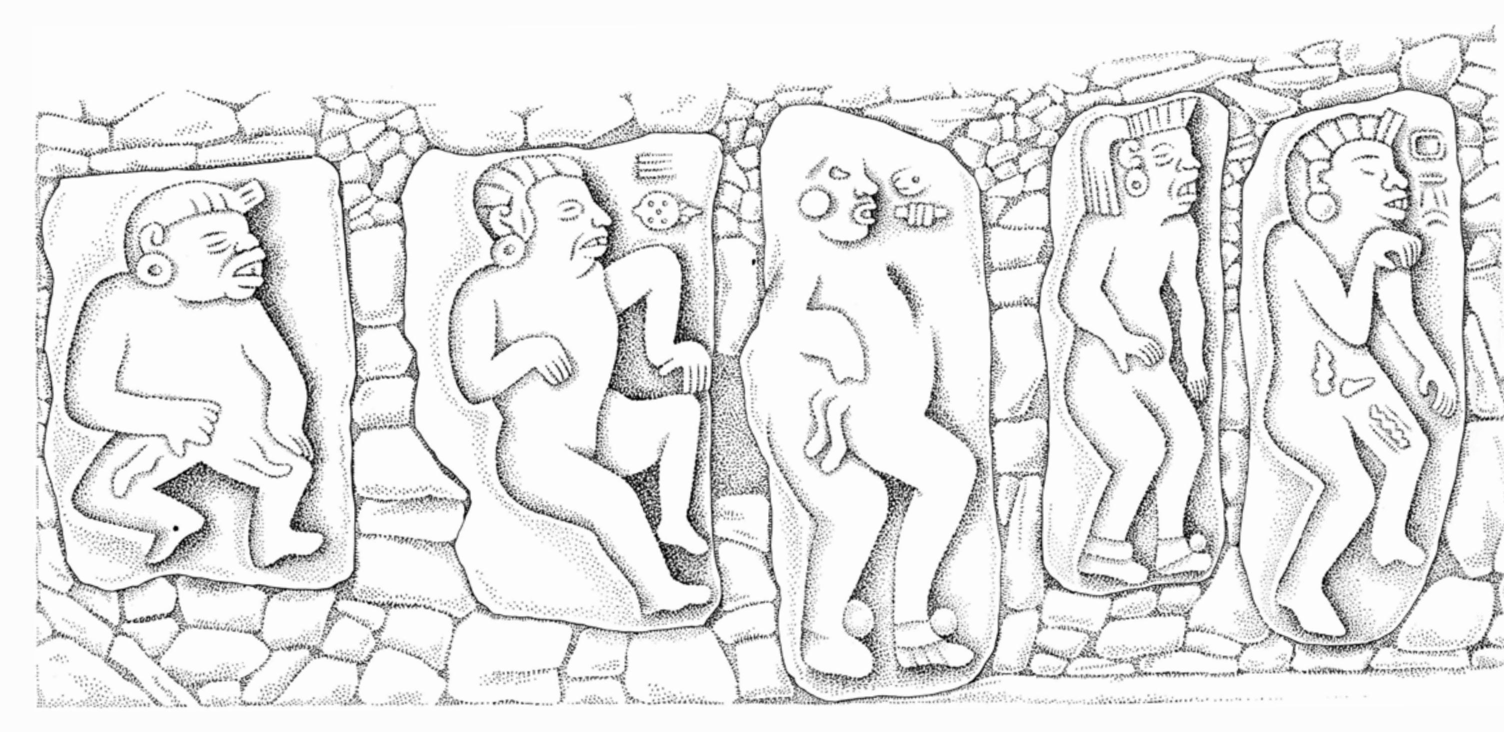
Uno de los principales edificios públicos erigidos en la plaza durante el Período II fue la Estructura J, notable por su planta en forma de punta de flecha. Incrustadas en los muros de la Estructura J había más de 40 losas de piedra talladas. Caso ha sugerido que cada una de estas "losas de conquista" representa un lugar subyugado por los gobernantes de Monte Albán en el período de expansión. Todas las tallas de estas losas incluyen los siguientes elementos: (1) un glifo de "cerro" o "lugar", que significa "el cerro de" o "el lugar de"; (2) un glifo (o combinación de glifos) sobre el glifo de cerro o lugar, que evidentemente representa el nombre del cerro o lugar, y (3) debajo del glifo de cerro o lugar una cabeza humana al revés y cuyo tocado varía de una losa a otra.

Caso consideró que estas cabezas representaban los jefes muertos de las áreas sojuzgadas y sugirió que los tocados eran distintos según las regiones, con lo que se reforzaba el sentido de los glifos de lugar que aparecían por encima de ellas. Unas cuantas losas también presentan textos glíficos. En su forma más completa incluyen signos de año, signos de mes y signos de día, así como glifos no calendáricos que están quizás relacionados con la fecha en que fue sometido un determinado lugar.

Considero que la interpretación de Caso de las losas de conquista es en esencia correcta. Esta opinión se refuerza por la semejanza entre los glifos de lugar y las descripciones zapotecas de lugares que aparecen en documentos más tardíos tales como el Lienzo de Guevea. Sobre la base de esta analogía podría sugerirse que las 40 losas representan 40 hitos: por ejemplo, "Cerro del Conejo", "Cerro del Pájaro" y "Cerro de la Planta del Chile". Tales marcas podían haber descrito los límites del territorio de Monte Albán en el Período II. Es posible, incluso, que la posición original de las losas en los muros de la Estructura J reflejaran la secuencia de estos hitos a lo largo de la frontera zapoteca. Esto, sin embargo, nunca podrá demostrarse, pues muchas de las losas se desprendieron de su sitio antes de que Caso las estudiara.

Sería obviamente útil averiguar la situación de los hitos, aunque es improbable que ni siquiera un tercio de ellos pudieran localizarse con precisión. Yo he sugerido, no obstante, que unos cuantos podrían localizarse comparándolos con la relación en un documento histórico, el Códice Mendoza. Este códice es una obra azteca del siglo XVI que incluye 35 lugares de Oaxaca que pagaban tributo a los señores supremos aztecas de aquella época. El documento muestra muchos lugares por medio de glifos de cerros y yo sospecho que estos glifos pudieran ser simplemente versiones aztecas de nombres zapotecas de lugar.

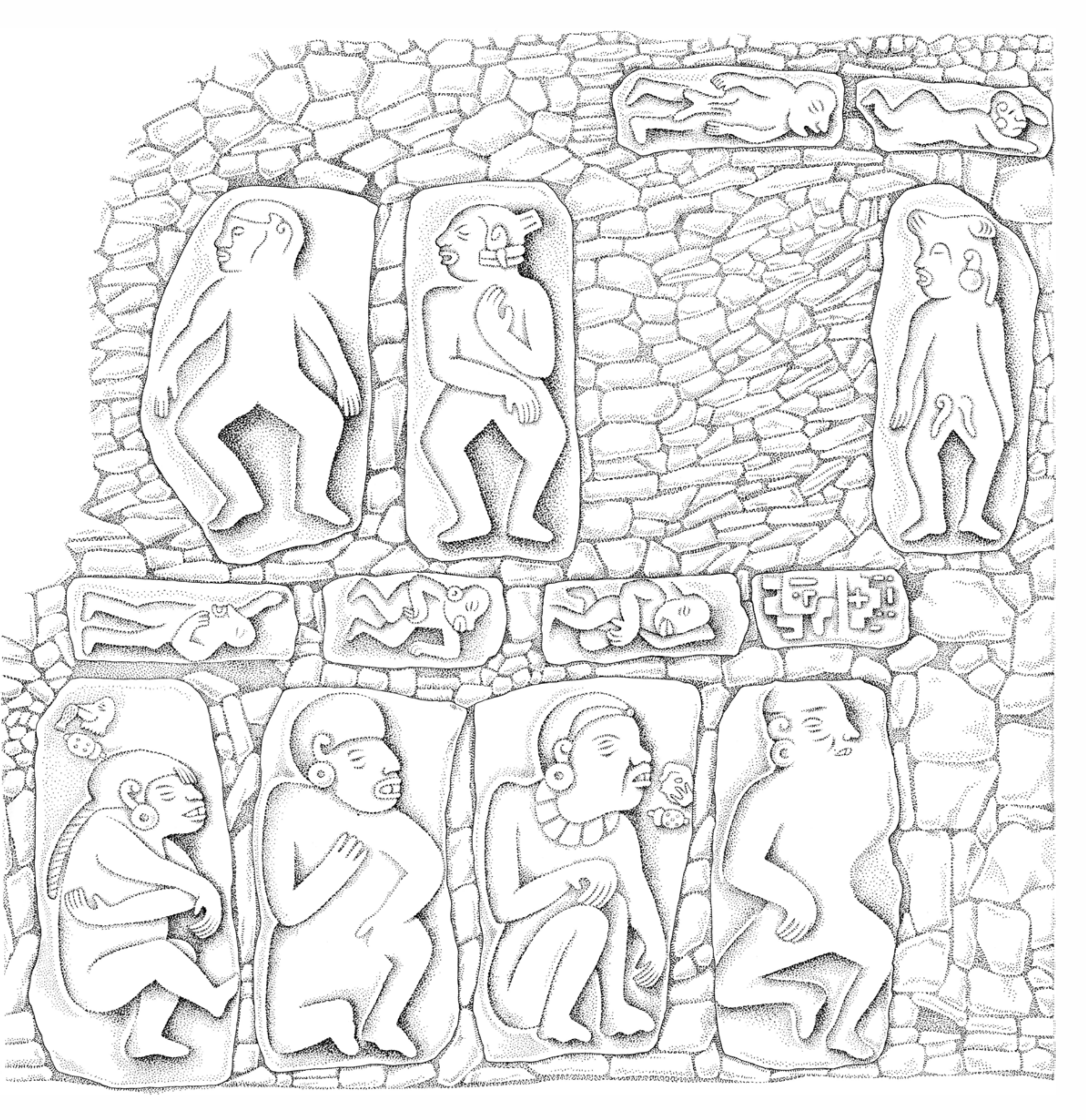
Desde que hice esta sugerencia he encontrado cuatro glifos de lugar en códices que se parecen mucho a determinados glifos de las losas de conquista. Los nombres de los cuatro lugares, todos ellos dentro de una distancia de 140 kilómetros de la ciudad de Oaxaca, son Miahuapan (actual Miahuatlán de Porfirio Díaz), un nombre azteca que significa "Lugar en el Agua de las Borlas [inflorescencia] del Maíz"; Cuicatlan, tér-



GALERIA DE LOS CAUTIVOS en el Edificio L de la Gran Plaza de Monte Albán. Así aparecía cuando se descubrió en 1931 bajo niveles de construcción más tardíos. Las hiladas alternantes de representaciones verticales y horizontales de prisioneros sacrificados pueden haber incluido en

mino azteca para "Lugar del Canto"; Tototepec (actual Tututepec), en azteca "Cerro del Pájaro", y Ocelotepec, en azteca "Cerro del Jaguar". Los glifos de las losas de conquista y los glifos del códice que concuerdan estrechamente con estos nombres de lugar muestran, respectivamente, la inflorescencia del maíz en un canal de riego, una cabeza humana con una voluta emplumada que sale de su boca, un pájaro en lo alto de un cerro y un jaguar también en lo alto de un cerro.

Tal correlación entre un códice azteca del siglo XVI y glifos zapotecas del Período II suponen una continuidad de nombres de lugar a lo largo de unos 1500 años. De aquí que mi sugerencia no sea más que una hipótesis sujeta a aprobación o desaprobación por medio de futuros análisis. Recientemente, sin embargo, el trabajo de Charles Spencer, de la Universidad de Michigan, y de Elsa M. Redmond, de la Universidad de Yale, realizado en la cercanía de Cuicatlán, el "Lugar del Canto", ha proporcionado un cierto grado de confirmación. Parece ser que en esta región, originalmente autónoma, el control pasó a manos zapotecas hacia el final del Período I o comienzos del Período II. En un asentamiento en las afueras de Cuicatlán, los conquistadores levantaron un



algún momento más de 300 figuras. Más de 100 piedras talladas fueron trasladadas de su sitio para utilizarlas como material de construcción en otro lugar de Monte Albán. Cuando la exhibición se erigió debió ser una de las obras más impresionantes de propaganda militar en Mesoamérica.

edificio de calaveras del tipo del *tzompantli.* Más al norte fortificaron una cumbre, cerrando la principal ruta desde Oaxaca al vecino Valle de Tehuacán. Spencer y Redmond comprueban que la cerámica del Período II de Monte Albán se extiende hasta esta fortaleza de montaña. Más allá sólo aparece cerámica de estilo Tehuacán.

Quedan por realizar pruebas arqueológicas similares respecto de mi hipótesis en los otros tres pueblos, lo que no debería ser imposible. Tututepec y Miahuatlán en particular incluyen los restos de considerables asentamientos de Monte Albán II. También sería alentador descubrir la identidad de otros glifos de lugar en las losas de conquista.

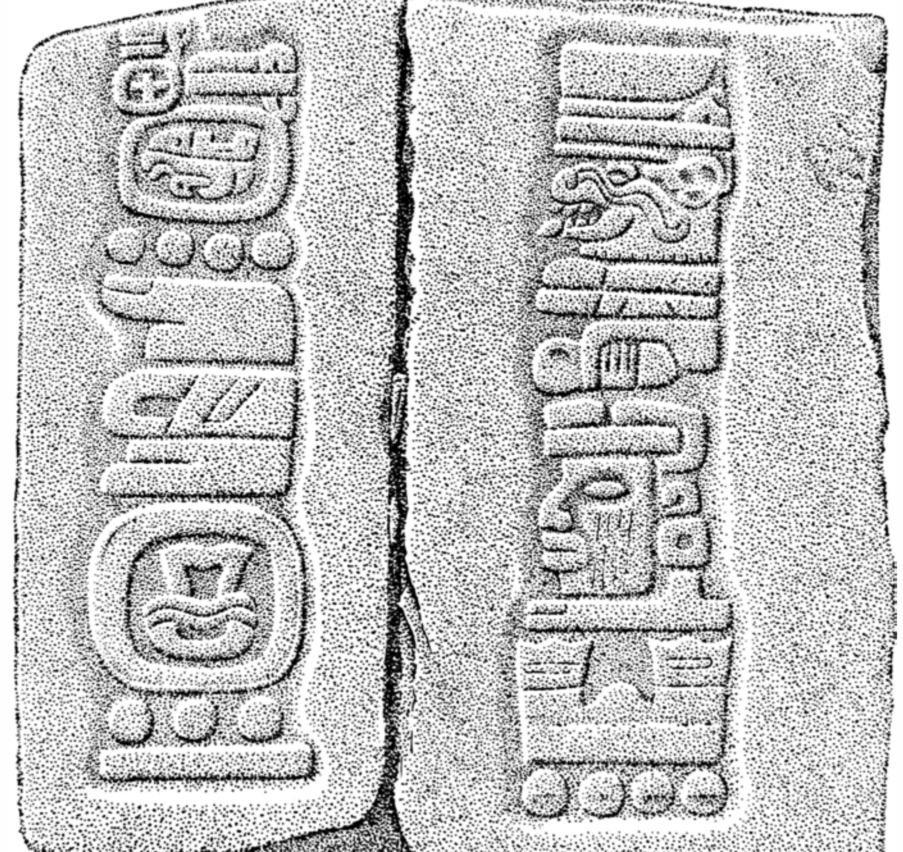
Durante el Período III en Monte Albán (100 a 600 de nuestra era) el asentamiento creció hasta cubrir más de seis kilómetros cuadrados; Blanton calcula que la población llegó a ser de unas 30.000 personas. Los cinco siglos del Período III se dividen en dos subfases (IIIa y IIIb), y el asentamiento alcanzó su tamaño máximo durante la segunda subfase. A lo largo del período, sin embargo, la expansión territorial zapoteca parece que decreció, quizá porque Monte Albán estaba ahora compitiendo económicamente con una metrópoli aún mayor.

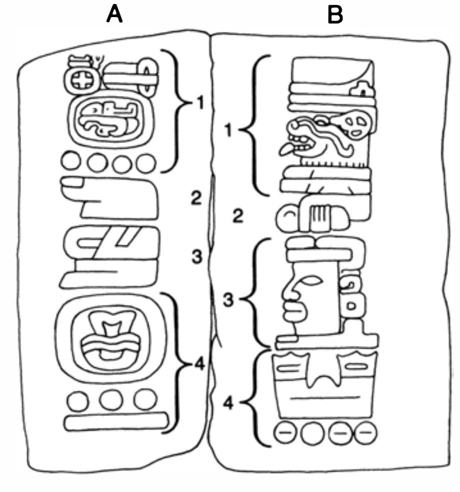
Esa metrópoli era Teotihuacán, 500 kilómetros al norte en la cuenca de México. Durante el mismo intervalo de 500 años, el rival septentrional de Monte Albán se había extendido hasta cubrir 25 kilómetros cuadrados; René Millon, de la Universidad de Rochester, calcula que su población era entonces de más de 100.000 habitantes. Aunque la región tributaria de Teotihuacán no está todavía bien definida, debió ser muchas veces más grande que la de Monte Albán, y su zona de influencia debió ser todavía mayor. Por ejemplo, existen testimonios de la influencia de Teotihuacán en el yacimiento maya de Kaminaljuyú, 900 kilómetros al sur en Guatemala. Clara Millon, de la Universidad de Rochester, ha sugerido que un tipo particular de ornamentación de cabeza, "el tocado de borlas [del maíz]" está asociado con la representación de ciertos personajes que evidentemente viajaron hasta distantes partes de Mesoamérica, quizá como una especie de embajadores. Esta sugerencia se ve apoyada en el yacimiento de Guatemala por las representaciones del tocado de borlas sobre cerámica pintada.

René y Clara Millon encuentran pruebas de una relación especial entre Teotihuacán y Monte Albán. Por ejemplo, aparentemente existió una colonia zapoteca durante un siglo (desde aproximadamente 200 al 300 de nuestra era) en las afueras occidentales de Teotihuacán. El enclave zapoteca se extendía por más de una hectárea y sus restos incluyen residencias, tumbas, urnas funerarias y otros materiales cerámicos del estilo Monte Albán. La jamba de piedra de la puerta de una tumba aparece inscrita con un glifo zapoteca.

Blanton no ha encontrado en Monte Albán una colonia teotihuacana que pudiera corresponderse. Sin embargo, algunos monumentos de piedra de la subfase IIIa prueban la existencia de relaciones entre estas dos grandes ciudades de Mesoamérica. Quizá la más impresionante de las estructuras construidas en Monte Albán durante la fase IIIa es la Plataforma Sur de la Gran Plaza. Se trata de una pirámide truncada de 15 metros de altura y más de cien metros de lado en la base. En las cuatro esquinas de la pirámide se levantaban un cierto número de monumentos de piedra.

Ocho de los monumentos repiten los temas militaristas de los Períodos I y II. Seis de ellos muestran cautivos, evidentemente prisioneros de superior status, con los brazos atados a la espalda. Debajo de cada cautivo hay un glifo de cerro que probablemente indica su lugar





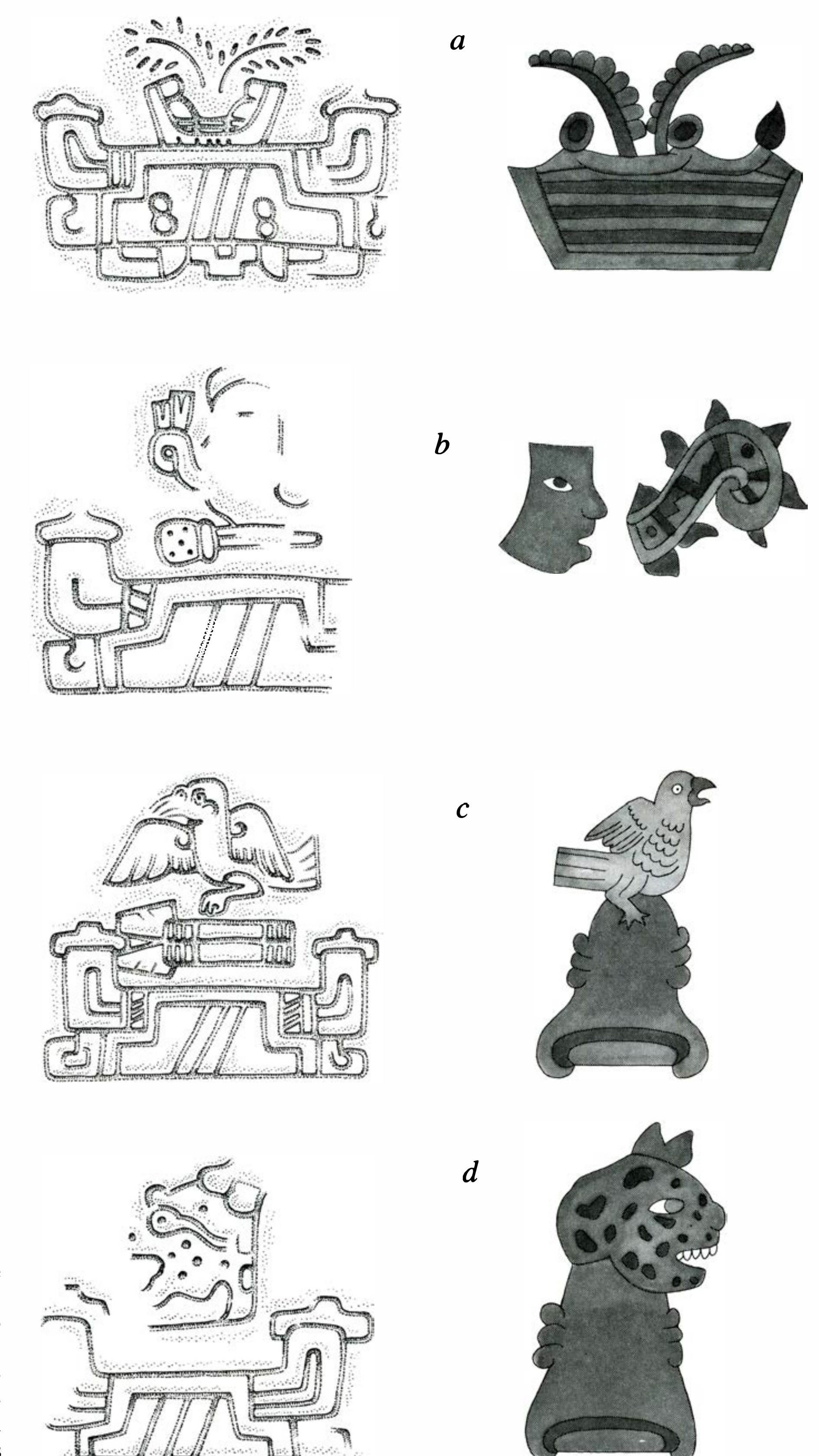
EL TEXTO EN DOS COLUMNAS, casi con certeza una sola inscripción en su tiempo, es una de las inscripciones más antiguas conocidas de Monte Albán. Es intraducible, pero pueden interpretarse muchos de los glifos (*véase plano a la derecha*). A-1 es un glifo calendárico, específicamente el signo de año "4 Serpiente". A-2 no es calendárico; una mano con el pulgar prominente puede ser un verbo. El significado de A-3 se desconoce. A-4 es calendárico; su lectura es "8 Agua" y puede ser un signo de día. B-1 es calendárico y su lectura parece ser "10 Jaguar"; puede ser un signo de mes o un nombre calendárico. B-2, una mano agarrando un objeto, no es calendárico; al igual que A-2, puede ser un verbo. B-3, una cabeza de perfil con un dedo debajo, puede ser un nombre personal. Parte de la lectura de B-4, glifo calendárico, es "4"; la otra no está descifrada. Es un signo de mes.

de origen. Las figuras en los otros dos monumentos contrastan fuertemente con los seis cautivos, pues están elegantemente ataviados y armados con lanzas. Probablemente representan líderes zapotecas.

Cuando se descubrieron estos monumentos a principios de este siglo, junto con una novena estela que no presenta ninguna figura y por eso se llamó la *estela lisa*, no parecía que ofrecieran ninguna inscripción que no fueran las figuras humanas y los glifos de cerro. Trabajos posteriores en la Plataforma Sur, en la década de 1950, revelaron no obstante que cuatro de los monumentos tenían también inscripciones en los bordes y en otros lugares. Los cuatro monumentos eran la Estela Núm. 1 (esquina noreste), Núm. 7 (esquina suroeste), Núm. 8 (esquina sureste) y la *estela lisa* (esquina noroeste). Durante la investigación de estas inscripciones, Jorge Acosta, del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, halló que algunas cajas ofrendas habían sido colocadas en tres de las cuatro esquinas de la plataforma. Las cajas contenían conchas, jade y cerámica del estilo Monte Albán IIIa.

Las inscripciones de los bordes de los cuatro monumentos presentan todas casi la misma información. Ocho individuos con sus nombres se representan en total en dos grupos de a cuatro. Aparecen saliendo de un lugar donde los templos están decorados según el estilo de un distrito de Teotihuacán: Tetitla. Todos los viajeros llevan el tipo de tocado con borlas identificado por Clara Millon como posiblemente propio de embajadores. Luego se ve a los ocho llegando a un lugar llamado "Cerro de 1 Jaguar", donde son saludados por un oficial que lleva el típico tocado zapoteca. A la vista de la asociación física entre las estelas y las cajas ofrendas, no es improbable que la visita de los ocho viajeros coincidiera con la dedicación de la Plataforma Sur. "Cerro de 1 Jaguar" pudo ser el nombre de la totalidad o parte de Monte Albán.

Aunque todas las inscripciones ofrecen la misma información, las inscripciones varían en detalles. Por ejemplo, la Estela Núm. 7 muestra a cuatro de los viajeros, acompañados de sus glifos de nombre. En la Estela Núm. 8 los mismos cuatro viajeros aparecen de manera diferente; cada uno está representado por un tocado de flores, un incensario de estilo Teotihuacán y luego un nombre calendárico y un apodo. Tres de los nombres calendáricos pueden leerse de la manera siguiente: "5 Turquesa", "12

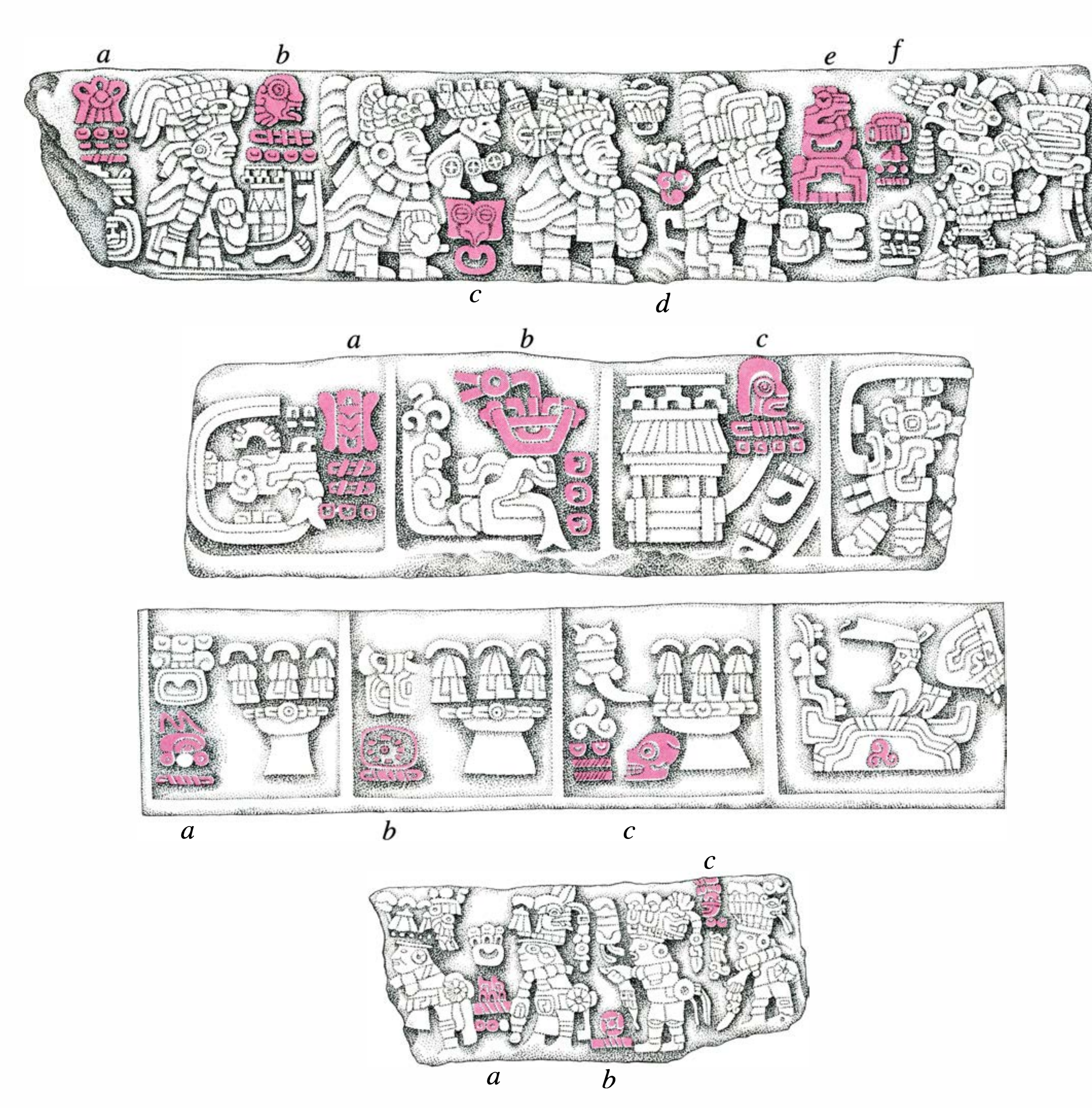


CUATRO TOPONIMOS, glifos que describen lugares geográficos, aparecen a la izquierda; se han seleccionado entre este tipo de glifos que en número superior a 40 aparecen tallados en las losas de conquista de la Estructura J de Monte Albán. A la derecha hay cuatro topónimos que se corresponden y están tomados de un documento pintado azteca que es una lista de lugares de Oaxaca que estaban pagando tributo a los aztecas en el siglo XVI. Los nombres aztecas asociados con los topónimos son (*a*) Miahuapan, "Lugar en el Agua de las Borlas/ inflorescencia/ del Maíz", (*b*) Cuicatlán, "Lugar de Canto", (*c*) Tototepec, "Cerro del Pájaro", y (*d*) Ocelotepec, "Cerro del Jáguar". El parecido entre los topónimos aztecas y los glifos zapotecas hacen pensar que los señores supremos aztecas simplemente tradujeron nombres zapotecas de lugar que ya eran muy antiguos. Los cuatro lugares, todos ellos a no más de 140 kilómetros de distancia de la ciudad de Oaxaca, se conocen ahora por sus nombres aztecas.

Calavera" y "7[?] *N*". (El interrogante significa que la identificación del número no es segura, y la letra *N* es la designación de Caso para este glifo zapoteca todavía no descifrado.)

Los otros cuatro viajeros aparecen nombrados en el otro lado de la *estela lisa.* Estos nombres son más fáciles de leer: "13 Nudo", "9 Mono", "1 Búho" y "Triple Voluta". (El último nombre es un símbolo iconográfico frecuente en Teotihuacán.) Se ve cómo los cuatro viajeros son saludados por un gobernante zapoteca cuyo nombre es "8 [seguido de un glifo no descifrado]" y cuya residencia se señala como "Cerro de 1 Jaguar". Las inscripciones en los bordes superior e inferior de la Estela Núm. 1 se refieren a los mismos cuatro viajeros en forma abreviada; las huellas de los viajeros aparecen también saliendo de un templo del estilo de Tetitla.

Como han indicado René y Clara Millon, ninguna representación de un

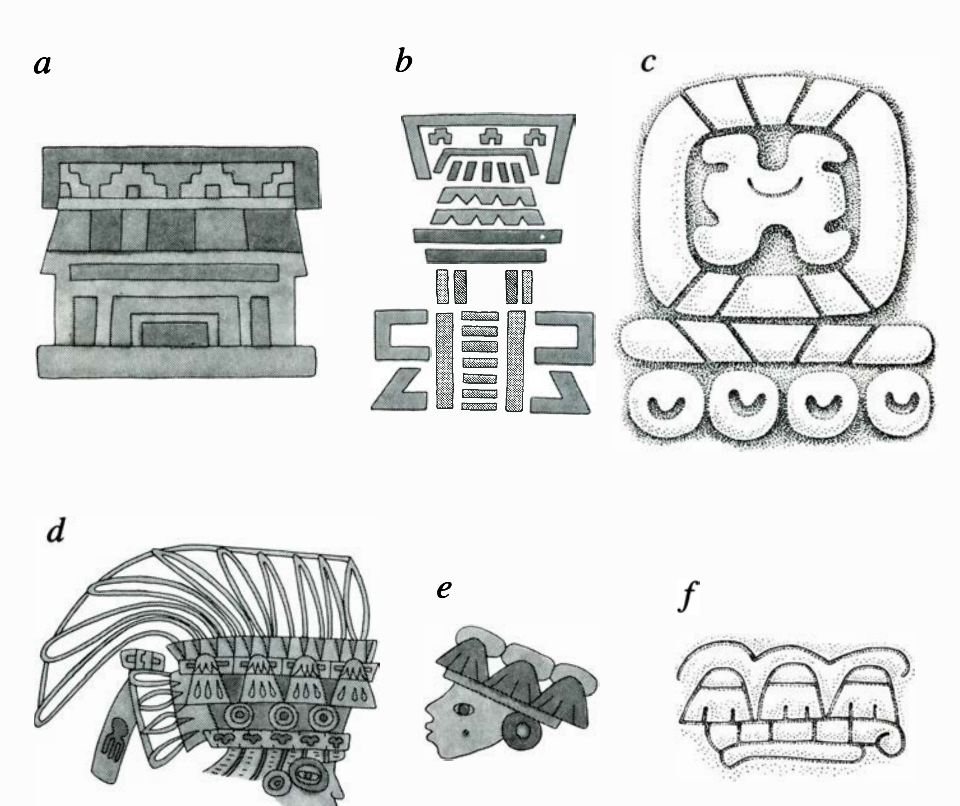


LAS INSCRIPCIONES DE "VISITANTES" aparecen en cuatro monumentos en las esquinas de la Plataforma Sur de la Gran Plaza de Monte Albán. Las inscripciones transmiten la misma información en formas diferentes: ocho personajes han venido de Teotihuacán en una visita pacífica. La inscripción superior aparece en un monumento conocido como *estela lisa*. Cuatro de los personajes aparecen mirando a la derecha. Sus nombres, marcados en color de izquierda a derecha, son (*a*) "13 Nudo", (*b*) "9 Mono", (*c*) "1 Búho", y (*d*) "Triple Voluta". Inmediatamente delante de "Triple Voluta" figura el topónimo "Cerro de 1 Jaguar" (*e*). Mirando hacia los cuatro personajes hay un gobernante zapoteca con todas sus galas; su nombre (*f*) se señala como "8 [desconocido]". La segunda inscripción pertenece a la Estela Núm. 1. Los visitantes no se ven, pero se identifican por sus nombres; los nombres son (*a*) "13 Nudo", (*b*) "3 [glifo *C* de Caso]" y (*c*) "9 Mono". Un cuarto nombre aparecería probablemente en el extremo derecho, pero falta esa parte de la talla. Asociada con "9 Mono" hay una referencia a Teotihuacán en forma de una fachada de templo característica de un distrito urbano y una referencia a un viaje (*abajo a la derecha*) en forma de huellas de pie que ascienden. La tercera inscripción figura en la Estela Núm. 8. Los nombres, pero no las figuras de los visitantes que se ven en la cuarta inscripción, presentan el mismo orden de izquierda a derecha (*color*). A la derecha de cada nombre hay un incensario con un "tocado de borlas" arriba. La inscripción incluye el topónimo conocido como un signo de cerro. Dentro de él está el signo de la triple voluta que es prominente en la iconografía de Teotihuacán (*véase* d *en la inscripción superior*); el topónimo puede por tanto referirse a la ciudad. La cuarta inscripción corresponde a la Estela Núm. 7; aparecen cuatro visitantes, todos mirando hacia la izquierda. Se dan los nombres de tres: (*a*) "7 [?] [glifo *N* de Caso]", (*b*) "5 [glifo *D* de Caso]", y (*c*) "12 Calavera". Los cuatro visitantes llevan el tocado de borlas que los identifica como enviados de Teotihuacán; los tres cuyas manos se distinguen llevan bolsas de copal.

personaje teotihuacano en un monumento zapoteca lo muestra con vestidura militar o con armas. Por ejemplo, las figuras con el tocado de borlas en los monumentos de la Plataforma Sur están vestidos con atuendo ceremonial y llevan bolsas de copal, el incienso quemado en el ritual mesoamericano. Podría concluirse que mientras las relaciones entre Monte Albán y algunos de sus otros vecinos fueron frecuentemente hostiles, la visita de personajes teotihuacanos a "Cerro de 1 Jaguar" constituyeron relaciones externas pacíficas.

Sobre las relaciones entre Monte Albán y Teotihuacán salió a la luz más información en 1936, cuando una losa de travertino pulimentada se descubrió en el Montículo X, al noreste de la Gran Plaza. En esta losa, conocida como la Lápida de Bazán, aparecen dos figuras; una de ellas, a la izquierda, está vestida en estilo teotihuacano y lleva una bolsa de copal en una mano. La otra viste como un jaguar según el estilo de los señores de Monte Albán. Caso, que fue el primero en reconocer la figura de la izquierda como un personaje teotihuacano, leyó su nombre calendárico como "8 Turquesa". El nombre del señor jaguar es "3 Turquesa".

Acompañando a cada figura hay una columna de glifos. Ninguno de los "textos" contiene signo calendárico alguno y así parece plausible que las inscripciones son esencialmente narrativas y que probablemente tienen carácter político e histórico. A Teotihuacán se alude dos veces: mediante la representación de un tocado de borlas (columna A, glifo 6, o A-6) y por la representación de un pie con una sandalia estilo Teotihuacán (B-4). El viaje se indica por huellas de pie (A-7 y B-6) y por el lenguaje florido mediante volutas que salen de una cabeza (A-5) y del "hocico de un jaguar" (B-7). También aparecen un incensario de estilo zapoteco (A-8) y una mano que sostiene un solo frijol (A-4). De acuerdo con relatos del siglo XVI, los frijoles los utilizaban los adivinos zapotecas para tomar decisiones sobre asuntos importantes. Esta representación de un solo frijol puede indicar que después de haberse retirado frijoles de un montón en grupos de dos, cuatro y así sucesivamente, según la forma prescrita en el siglo XVI, el "número impar" que quedaba decidía lo que quiera que fuese el asunto. Las inscripciones también incluyen cierto número de glifos con gestos de mano del tipo que he sugerido que fueron probablemente verbos de acción. Finalmente, las series de glifos desde A-5 hasta A-7 podrían leerse como "Representante de Teotihuacán venía a conferenciar".



RELACIONES ENTRE MONTE ALBAN Y TEOTIHUACAN, reflejadas en el arte de ambas ciudades. La pintura mural de la fachada de un templo de Teotihuacán en el distrito de Tetitla (*a*) se desarrolla en una decoración sobre cerámica de Teotihuacán (*b*). Una fachada de templo en el estilo de Tetitla aparece en la Estela Núm. 1 de Monte Albán (*véase la ilustración de la página anterior*). El glifo calendárico zapoteca "9 Temblor" (*c*) aparece en las jambas de una entrada a una tumba en el enclave zapoteca de Teotihuacán; el mismo elemento aparece en el monumento Núm. 3 en San José Mogote. Las pinturas murales de Teotihuacán (*d*) proporcionan los detalles de los tocados de borlas asociados con viajeros importantes de Teotihuacán. Estos personajes impresionaron evidentemente a los mayas de Guatemala a juzgar por una representación simplificada de un tocado (*e*) en un cuenco procedente del yacimiento de Kaminaljuyú. El mismo tocado de estilo teotihuacano aparece en monumentos de Monte Albán tales como la Estela Núm. 8 (*véase la ilustración de la página anterior*) y la Lápida de Bazán (*f*).

Pendiente de un desciframiento completo de la Lápida de Bazán, yo la considero provisionalmente como un registro de un acuerdo entre representantes de las dos ciudades. Según mi interpretación, los representantes viajaron, se encontraron, hablaron, consultaron adivinos y quemaron incienso. Este último acto habría establecido la condición de obligación que adquiría su acuerdo al situarlo dentro de un contexto sagrado. Probablemente fue a través de encuentros diplomáticos de este tipo cómo Monte Albán y su vecino mucho más grande, Teotihuacán, mantuvieron una conveniente distancia social, regularon sus fronteras tributarias y preservaron su especial relación mutua.

Hacia el año 600 de nuestra era, la gran metrópoli de Teotihuacán fue prácticamente abandonada y muchos de sus templos y edificios principales, incendiados. Esta crisis podía haber proporcionado, en teoría, una favorable oportunidad a los gobernantes de Monte Albán para expansionar el reino zapoteca. Sin embargo, por razones desconocidas, aproximadamente por estas mismas fechas comenzó también a declinar Monte Albán. Aunque la capital zapoteca no fue nunca incendiada ni tampoco nunca fue enteramente abandonada, la construcción pública alrededor de la Gran Plaza cesó con el final del Período III hacia el año 700.

De un máximo de unas 30.000 personas durante la subfase IIIb, la población de Monte Albán se redujo rápidamente durante los períodos siguientes: Período IV (700 a 1000) y Período V (1000 a 1520). Hacia el año 1300, permanecían solamente entre 4000 y 8000 habitantes. ¿Qué había ocurrido? Blanton ha sugerido que un motivo para mantener una gran población durante el Período III fue el proporcionar una barrera contra la posible expansión de Teotihuacán en la región de Oaxaca. Si esto fue así, el colapso de Teotihuacán habría eliminado el incentivo principal para mantener un centro urbano en Monte Albán. En cualquier caso, la confederación centrada en Monte Albán durante más de 1000 años comenzó a disolverse a medida que la población urbana fue derivando hacia diversos centros cívicos y ceremoniales rivales situados en el



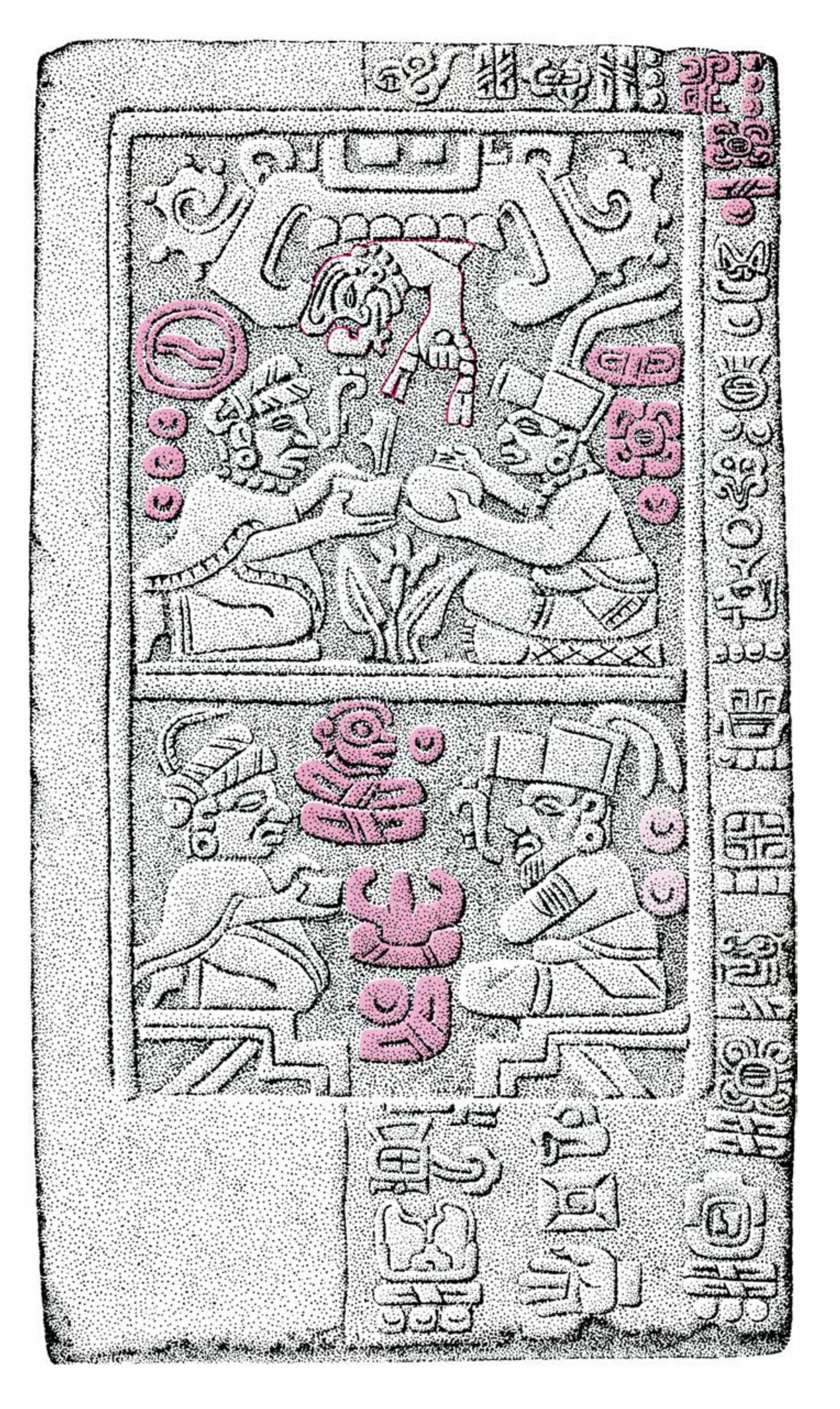
LA LAPIDA DE BAZAN, una losa de travertino pulimentado, fue desenterrada en 1936 en el Montículo X, al noreste de la Gran Plaza de Monte Albán. La figura de la izquierda, "8 turquesa" (*glifos coloreados*), es evidentemente un visitante de Teotihuacán. La figura de la derecha, "3 Turquesa", vestida como un señor jaguar, es probablemente el gobernante, o algún alto dignatario, de Monte Albán. Las dos columnas de glifos (A *y* B *en el plano arriba a la izquierda*) no incluyen glifos calendáricos; parece, pues, plausible que su intención es narrativa. A Teotihuacán se alude dos veces; una, por medio de un tocado de borlas (*A-6*) y otra por una sandalia (*B-4*) de estilo teotihuacano. El viaje se indica con huellas de pie (*A-7, B-6*), y el lenguaje florido por medio de dos volutas (*A-5, B-7*). El sentido ritual lo sugieren un incensario (*A-B*), y la adivinación representada por una mano que sostiene un fríjol (*A-4*). Los glifos de mano (*B-1, B-2*) pueden ser verbos. El monumento quizá conmemora la fecha de un acuerdo.

fondo del valle. El Valle de Oaxaca no volvió a unirse hasta la llegada de los españoles en 1529.

Muchos de los centros competidores (Cuilapan, Zaachila, Macuilxóchitl, Mitla, Matatlán, Lambityeco y otros) existían ya como aldeas cuando Monte Albán fue inicialmente fundada. Algunos habían comenzado a crecer de nuevo hacia el final de la subfase IIIb, como si estuvieran anticipándose a la decadencia de la ciudad montañosa. Durante el Período IV todos estos centros del valle se expansionaron rápidamente; esto fue quizás en parte resultado del simple crecimiento interno, pero la expansión pudo haber venido parcialmente como consecuencia de la absorción de inmigrantes procedentes de Monte Albán. Muchos de los centros del valle eran todavía importantes en lo político, económico y religioso cuando los españoles redactaron las primeras descripciones extensas sobre el pueblo zapoteca en el período de 1579 a 1581.

Cuando terminaba el Período III y comenzaba el Período IV en Monte Albán, una innovación fue la aparición de un nuevo tipo de monumento de piedra que yo llamo registro genealógico. A diferencia de los grandes monumentos de piedra de los períodos precedentes, que obviamente respondían a la intención de que fueran vistos desde alguna distancia, los registros genealógicos son pequeños y sólo pueden leerse de cerca. Muchos que he medido tienen solamente de 50 a 60 centímetros de altura y de 30 a 40 centímetros de ancho. En vez de estar colocados en edificios públicos, estas pequeñas piedras parecen haber sido instaladas en las residencias de la élite zapoteca o (como en Cuilapan y Lambityeco) colocadas en sus tumbas. Las inscripciones de los registros no recogen los temas militares de los primeros períodos de Monte Albán, sino los nacimientos, ascendencia y matrimonios de los gobernantes y nobles zapotecas de la época.

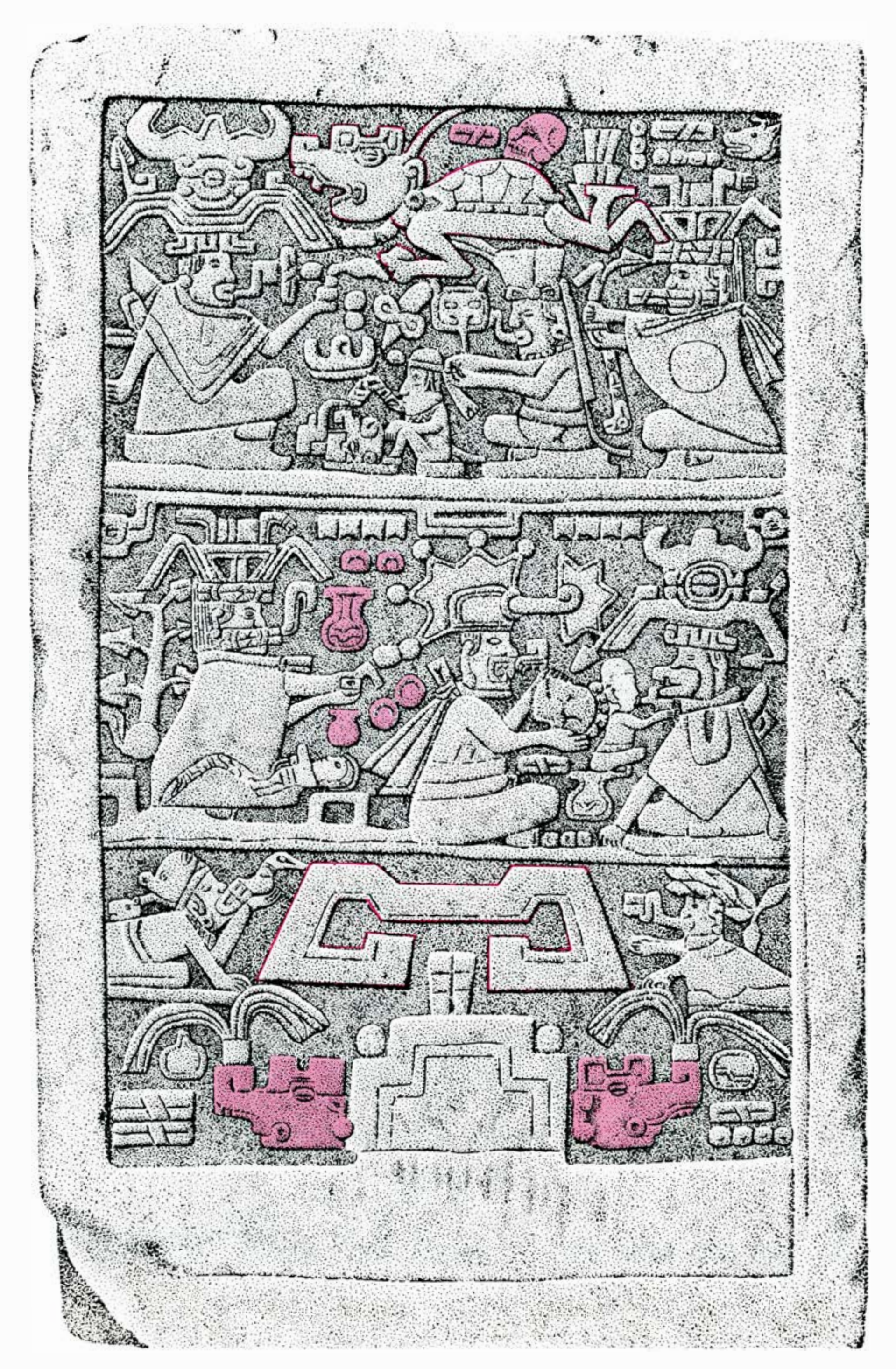
Son particularmente frecuentes en los registros las representaciones de matrimonios reales. Después de la decadencia de Monte Albán tales uniones fueron uno de los medios principales a través de los cuales los zapotecas establecieron alianzas políticas entre dos comunidades importantes. El marido y la esposa regios se muestran generalmente mirándose uno al otro, sentados en alfombras tejidas o suspendidos sobre glifos de cerros; en algunos casos se incluyen sus nombres calendáricos. La pareja puede representarse quemando incienso o compartiendo una copa de chocolate o pulque. Sobre ellos aparece un elemento glífico que Caso ha denominado las



REGISTRO GENEALOGICO procedente de Zaachila, en el Valle de Oaxaca, que muestra dos generaciones de una familia real después de la decadencia de Monte Albán. Una larga inscripción ocupa tres de los cuatro lados de este pequeño monumento. La pareja real en el panel inferior son "11 Mono" (*glifos superiores coloreados*) y "6 [quizás 8] Flor" (*glifos inferiores*); la cifra depende de si los dos puntos numerales detrás de la espalda del hombre se suman a los glifos de su nombre. El panel superior deja constancia, evidentemente, del matrimonio de una pareja real. Emergiendo de las "Mandíbulas del Cielo" (*arriba*) hay una figura (*contorno coloreado*) sosteniendo un cordón de cuentas. Los nombres de la pareja esculpida (*en color*) son "3 Serpiente" (*a la izquierda*) y "6 Temblor" (*a la derecha*). Los nombres aparecen también en la inscripción (*en color arriba a la derecha*). (Las ilustraciones de esta página, la inferior de la página precedente y la de la siguiente fueron realizadas por Mark Orsen.)

"Mandíbulas del Cielo", junto con otros elementos iconográficos indicadores de descendencia real.

En los registros genealógicos más elaborados puede uno trazar una historia de acontecimientos relativos al personaje real. Por ejemplo, el registro puede empezar con el matrimonio de los padres del sujeto, luego continuar con su propio nacimiento y quizá concluir con su matrimonio. Los hechos se muestran en forma de panel, uno sobre otro. Yo creo que con la intención de que se lean desde abajo, donde se muestran los acontecimientos más antiguos, hacia arriba, donde aparecen los más recientes. Además, deben leerse alternativamente de izquierda a derecha y de derecha a izquierda según el sistema de lectura conocido como bustrófedon (que significa en griego "como da la vuelta el buey que tira del arado").



REGISTRO DE NORIEGA, otro yacimiento en el Valle de Oaxaca, que incluye en el panel inferior las "Mandíbulas del Cielo" (*contorno coloreado*) y dos cabezas de reptil (*color*). En el panel intermedio, leyendo de izquierda a derecha, una mujer "2 Agua" (*glifos superiores coloreados*), da a luz a un niño, "2 Vasija" (*glifos inferiores*). En el centro hay un hombre con un tocado; a la derecha se ve ahora el niño lo bastante crecido como para permanecer sentado; mira hacia una figura masculina, posiblemente su padre. En el panel superior, leyendo de derecha a izquierda, aparece de nuevo la madre del niño con un "cetro maniquí". En la ilustración central aparece otra vez el niño, todavía mayor; un adulto no identificado ajusta al niño la banda de cabeza. El niño mira hacia un hombre en el extremo izquierdo, que posiblemente es de nuevo su padre (los tocados son iguales). Arriba en el centro se ve una "tortuga voladora" (*contorno coloreado*); su cabeza recuerda las cabezas de reptil del panel inferior; lleva el nombre "5 Calavera" (*glifos coloreados*). La imagen de la tortuga, como las "Mandíbulas del Cielo", reforzaban el contexto genealógico de la inscripción: la descendencia real de un heredero recién nacido.

Tanto el orden de lectura de estos registros como su contenido son altamente significativos. Primero, puede parecer sorprendente que un sistema de lectura conocido en Europa en tiempos clásicos griegos haya sido inventado independientemente en el Nuevo Mundo precolombino para la exhibición de información genealógica. El hecho es que hay en el Nuevo Mundo precedente del sistema entre los mixtecas, que eran vecinos cercanos de los zapotecas. Situados inmediatamente al norte y oeste, los mixtecas de los siglos XV y XVI pintaron historias genealógicas y de otros asuntos sobre piel de venado plegada en forma de biombo, y estos códices debían leerse en el estilo bustrófedon. Los orígenes de esta tradición mixteca de historias pintadas permanecen obscuros, pero la posibilidad de que los registros genealógicos zapotecas, esculpidos en piedra entre el 700 y 900 de nuestra era, fueran ideados para leerse en direcciones alternantes sugieren que el concepto es antiguo en el Nuevo Mundo.

Será instructivo examinar en detalle un registro genealógico zapoteca. He seleccionado como ejemplo uno que ahora se conserva en el Museo Nacional de Antropología de la ciudad de México. Se dice que procede de Zaachila, un yacimiento en el fondo de un valle que llegó a ser prominente cuando la decadencia de Monte Albán; parece que recoge dos generaciones de una familia real. En el panel superior hay una típica escena de boda. Un hombre está sentado sobre una alfombra tejida y una mujer arrodillada; cada uno sostiene una vasija de cerámica. El nombre calendárico de la mujer es "3 Serpiente" y el del hombre es "6 Temblor". (El glifo de la serpiente es el glifo *M* de Caso; el glifo de Temblor es su glifo *L*.) Encima de la pareja están las "Mandíbulas del Cielo", flanqueadas por conchas estilizadas. Descendiendo de las "Mandíbulas del Cielo" hay un personaje, quizás ancestral o mítico, llevando en la mano un cordón de cuentas.

En el panel inferior se ve a una pareja más vieja, sentada sobre signos de cerro. Según mi orden de lectura, se trata probablemente de los ascendientes del marido o de la esposa del panel superior. El nombre de la mujer es "11 Mono". (El glifo del mono es el glifo *O* de Caso.)

El nombre del hombre, según los dos puntos detrás de sus espaldas se incluyen o no con el punto y la barra sobre su rodilla, es "6 Flor" u "8 Flor". (El glifo flor es el glifo *D* de Caso.)

Un rasgo sorprendente de este registro es una serie de 13 signos de día y coeficientes numerales que comienzan arriba a la derecha y van hacia abajo hasta el lado derecho de la pequeña piedra. Todos ellos son glifos calendáricos tomados del calendario ritual de 260 días, pero aparecen en un orden que no tiene sentido calendárico. ¿Son quizás una lista de nombres personales? En apoyo de tal interpretación tenemos el hecho de que la serie incluye los nombres de la pareja del panel superior, "3 Serpiente" y "6 Temblor". Yo sugiero que la serie vertical registra los nombres de los antecesores del marido o de la esposa (o de ambos) que están en el panel de arriba.

La serie vertical está acompañada en la base del registro por dos columnas de glifos más cortas que no son plenamente interpretables. Una columna incluye la imagen de una mano derecha abierta, que una vez más puede representar un verbo de acción. La otra columna debe registrar una fecha; incluye la expresión calendárica "8 [seguida del glifo *N* de Caso]", sobre la cual hay un glifo que Caso ha identificado como un signo de año. La fecha puede ser la de la boda de la pareja del panel superior.

Un segundo ejemplo es un famoso registro genealógico hallado en una tumba en Noriega, no lejos de Zaachila. Su inscripción ocupa tres paneles. El panel superior y el intermedio parecen trazar la vida de un noble joven desde el nacimiento hasta el final de la infancia. El panel inferior de nuevo muestra las "Mandíbulas del Cielo" y aparece sobre un signo de cerro que está flanqueado por dos cabezas de reptil. En lo que puede ser una escena ancestral o mítica, un hombre llamado "10 Vasija [?]" y una mujer llamada "9 Serpiente" aparecen a uno y otro lado de las "Mandíbulas del Cielo".

El panel intermedio está evidentemente pensado para leerse de izquierda a derecha. Siguiendo en este orden, se ve a la izquierda una mujer, "2 Agua", que da a luz a un niño, "2 Vasija [?]". En el centro hay una gran figura masculina con un tocado distintivo, que está ofreciendo algo al niño. A la derecha, el niño que es lo bastante mayor como para permanecer sentado, mira hacia una figura masculina, quizá su padre. Si ahora se invierte el orden de lectura y se comienza por el lado derecho del panel superior, se ve de nuevo a la madre del niño. La mujer tiene en la mano un bastón semejante a los que aparecen en monumentos mayas contemporáneos y que se conocen como "cetros maniquí". En el centro reaparece el niño, ahora todavía mayor; su banda para la cabeza la está ajustando un adulto no identificado. A la izquierda aparece el hombre, posiblemente otra vez el padre del niño, que se había visto a la derecha del panel intermedio.

Dominando el panel superior hay otro elemento iconográfico zapoteca: una "tortuga voladora" que lleva el nombre de "5 Calavera". La cabeza de la tortuga es similar en apariencia a otras cabezas de reptil en la parte baja del panel. Los documentos históricos sugieren que los zapotecas algunas veces imaginaron las "nubes sagradas" de donde descendieron sus gobernantes como si tales nubes tuvieran la apariencia de tortugas voladoras. De esta manera ambos elementos iconográficos del registro de Noriega, las "Mandíbulas del Cielo" y la "tortuga voladora", son consecuentes con el concepto de un registro genealógico.

Esta revisión de las inscripciones zapotecas tardías lleva mi razonamiento a un punto en el que es posible hacer un resumen global. Primero, yo creo que está claro que todas las inscripciones zapotecas, tempranas o tardías, están asociadas con la historia política. ¿Pueden reconocerse tendencias evolutivas? Yo creo que es evidente el progreso desde una fase temprana, cuando el "mensaje" de una inscripción se transmitía muy simplemente en una forma principalmente pictórica, hasta una fase tardía, cuando las exhibiciones glíficas más complejas sirvieron para elaborar el mensaje pictórico.

Por ejemplo, fue en el Período I cuando se creó en Monte Albán el mayor número de monumentos, los trescientos y pico "danzantes". El impacto total de esta demostración debió ser poderoso, pero cada uno de los monumentos transmitió una información relativamente escasa. Muchos menos monumentos se conocen del Período II, pero algunas de estas más o menos 50 obras presentan filas dobles de glifos y cada uno de los monumentos contiene mucha más información que la de cualquier monumento de "danzante". En realidad, muchos glifos zapotecas hacen su aparición en el Período II. Finalmente, la primera subfase del Período III es casi pobre en monumentos: sólo se erigieron en Monte Albán 15 más o menos. Sin embargo, el número y la variedad de los glifos de estos pocos monumentos representan otro incremento sustancial en la cantidad de información transmitida.

Para recapitular, al principio de la historia zapoteca los temas comunes de los monumentos eran escenas de cautivos y listas de lugares conquistados. Esta es la clase de propaganda que uno asocia con un estado que surge y que está luchando para conseguir el control sobre regiones antaño autónomas cuya resistencia desea disuadir. Una vez que Monte Albán se había convertido en un importante centro urbano, capital de lo que era incuestionablemente el estado más poderoso de las tierras altas del sur de México, sus monumentos comienzan a tratar temas de diplomacia. La Lápida de Bazán y las cuatro estelas en las esquinas de la Plataforma Sur reflejan relaciones pacíficas con Teotihuacán. Con la decadencia de Monte Albán después del Período III y el surgimiento de centros menores rivales en el Valle de Oaxaca, una de las principales preocupaciones de la nueva élite zapoteca llegó a ser la afirmación de su status real.

En lo que se refiere a las inscripciones monumentales, esa afirmación se consiguió por medio de registros genealógicos: exhibiciones que dejaban constancia del matrimonio y ascendencia del gobernante y que en algunos casos incluso se colocaron en la antecámara de la tumba real, donde el registro lo pudieran consultar las generaciones futuras. Incluso después de la conquista española, como demuestra el Lienzo de Guevea, el pueblo zapoteca se preocupaba todavía mucho por la ascendencia de sus gobernantes y por los hitos identificados por un nombre que delimitaban su territorio.

Estamos todavía muy lejos de poder "leer" la escritura zapoteca en la forma que pueden leerse los jeroglifos egipcios e incluso mayas. Temas importantes para nuevos estudios son las listas de lugares mencionados como hitos importantes, los "gestos de la mano" que pueden representar verbos de acción, los glifos no calendáricos, que parecen estar relacionados con información política y ritual, la correlación entre el calendario zapoteca y el europeo, la correspondencia entre la escritura zapoteca y la lengua hablada zapoteca; finalmente, la relación evolutiva entre el sistema zapoteca de escritura y los sistemas de mixtecas, aztecas y mayas. Solamente cuando se haya progresado en estos temas, será posible apreciar plenamente la contribución de este notable pueblo a la capacidad en tiempos precolombinos de leer y escribir. Y esta es una contribución que debe entenderse en sí misma y no simplemente en relación con sistemas de aparición más tardía y de los que poseemos un conocimiento mucho más detallado.

Ciencia y sociedad

Tecnología limpia para la producción de cloro

La producción de cloro por electrólisis de salmuera se ha realizado industrialmente, desde finales del siglo pasado, con dos tecnologías competitivas: células con cátodo de mercurio y células con diafragma. Las primeras, más versátiles, de mayor economía energética y mejor calidad de los productos que las segundas, han ganado mercado progresivamente, a lo largo de la primera mitad de este siglo, a costa de las segundas, más sencillas y económicas de concepción y construcción. Europa y Japón, entre las regiones desarrolladas, han favorecido especialmente el empleo de células con cátodo de mercurio, debido a la escasez de sus disponibilidades energéticas fundamentalmente, frente a los Estados Unidos, que basaba su producción preferentemente en las células con diafragma.

En las diversas corrientes residuales de las plantas con células de mercurio se perdían unas cantidades variables de este metal, en su forma metálica o en forma catiónica. Estas cantidades llegaban a superar los 500 gramos de mercurio por cada tonelada de cloro producida. En los últimos años de la década de los cincuenta se producen diversos casos mortales de encefalitis en Japón, principalmente entre familias de pescadores (Bahía de Minamata, Río Agano, entre otros). Tras unos años de investigaciones se atribuyen al mercurio ingerido, vía pescados, el origen de esas encefalitis, con lo que se origina un clamor popular que impulsa a todos los gobiernos, y fundamentalmente al japonés, a ocuparse del tema.

El origen de ese mercurio radica sobre todo en residuos que contienen el metal combinado en forma orgánica (metil-mercurio y etil-mercurio), procedentes de una planta de acetaldehído, que empleaba el mercurio como catalizador, y de pesticidas. Este tipo de residuos es asimilado por los seres vivos con una velocidad superior, en tres-cuatro órdenes de magnitud, a la asimilación de mercurio metálico o inorgánico, que constituye la forma en que lo emiten las plantas de cloro. Pero éstas no se libraron de constituir el objetivo de una legislación controladora de las emisiones.

Esa legislación elaborada progresivamente en todos los países desarrollados comenzó, en sus inicios, empleando criterios intensivos de emisión, especificando la concentración máxima tolerada en las aguas residuales. Posteriormente, de forma más elaborada y consecuente, pasó a especificar criterios extensivos, fijando, en función de la capacidad de recepción del medio ambiente, los límites máximos de emisión por cada tonelada producida de cloro. Estos últimos son los criterios vigentes en prácticamente todos los países que se han ocupado del tema y que, mediante revisión continua de la tecnología disponible, van modificando de un modo ininterminente los límites legales de emisión. La emisión se regula de forma global, considerando el conjunto de las emisiones normales en una planta o disposiciones particulares para cada tipo de corriente residual (residuos sólidos, líquidos o gaseosos).

Japón, el país más afectado por el problema, emplazó inicialmente a todas las plantas que empleaban células de mercurio para una sustitución total del proceso, eliminando la necesidad de este metal para 1975. Consideraciones posteriores, derivadas de la crisis energética, han pospuesto esa fecha límite hasta 1985. Ha sido el único país que ha tomado una postura tan extrema, explicable en parte por motivos comerciales. Actualmente, diversas compañías japonesas están promocionando nueva tecnología de células de electrólisis empleando membranas de intercambio catiónico.

En conjunto, y a pesar de estar en continua revisión, se puede considerar que los límites indicados señalan una postura de serenidad política sobre el tema, marcando límites razonables de actuación y eliminando la posibilidad, excluido Japón, de prohibir estas plantas. Europa, por su mayor dominio tecnológico de estas células y mayor vulnerabilidad energética, se ha distinguido por una mayor serenidad en este tema. Se ha desarrollado internacionalmente una tecnología para reducir las emisiones hasta estos límites. Esa tecnología, iniciada en los países más industrializados en los últimos años sesenta, ha evolucionado progresivamente para cumplir límites cada vez más estrictos.

Investigación Química Industrial (IQI), empresa dedicada exclusivamente al desarrollo de procesos químicos, y vinculada con un gran productor de cloro (Energía e Industrias Aragonesas, S. A.) y una importante compañía de ingeniería (Técnicas Reunidas, S. A.), se ocupó de desarrollar facetas propias de esta tecnología desde su fundación en 1975.

Desde entonces, ha desarrollado una panoplia completa de tecnología sobre el tema que permite reducir la contaminación por mercurio, en las plantas de cloro, hasta niveles inferiores al resto de las tecnologías existentes. En una primera etapa (años 1975 a 1977) sus trabajos se centraron en el desarrollo de procesos que, tratando las corrientes habituales de las plantas de cloro, las depuraran de mercurio, que se extraía selectivamente para devolverlo a las células hasta niveles inferiores. En esta etapa se desarrollaron los procesos MERCUREX (para depuración de aguas residuales), SAMEX (para purificación de salmuera sin emisión de mercurio) y MERCAD (purificación de hidrógeno y gases). Los dos primeros constituyen el conjunto incluido en el "Compendio de tecnologías sin o con bajos residuos" ("Low and non-waste technology") del Consejo de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, de reciente publicación.

En una segunda etapa, con concepción más avanzada, los trabajos de IQI se han orientado hacia un nuevo diseño de las células de mercurio que reduce la cuantía de las corrientes residuales hasta un extremo tal que haga innecesario prácticamente las instalaciones de desmercuriación de las mismas. Esta segunda etapa, por haber sido desarrollada posteriormente, no ha sido considerada en el compendio.

El primero de los procesos incluidos, el MERCUREX, opera por extracción selectiva del mercurio catiónico contenido en las aguas residuales. Mediante una operación líquido-líquido, se extrae continuamente el mercurio, que se recibe en concentraciones de 10-20 gramos por metro cúbico (ppm) dejando las aguas residuales con concentración inferior a 10 mg/m^3 (ppb), a menudo inferior a 3 miligramos por metro cúbico. El mercurio así extraído, más del 99,9 por ciento del originalmente emitido, se recicla, incorporándolo a la salmuera que alimenta la célula. Allí se reduce a su forma metálica manteniéndose en equilibrio. El volumen total de mercurio emitido dependerá del sistema de operación de la planta, que determina el volumen total de aguas residuales. Con una planta diseñada y operada correctamente el nivel extensivo de emisión, por este concepto, se mantiene sistemáticamente por debajo de 0,005 g/TCl_2 con valores puntuales inferiores a 0,001 gramo por TCl_2. Esto satisface las exigencias legales más estrictas. IQI ha tenido que desarrollar, para lograr esto, una combinación de agente extractor es-

pecífico y modificador de solubilidades, así como un control del potencial redox del sistema, que opera en etapas sucesivas de oxidación y reducción.

El segundo proceso incluido en el compendio, SAMEX, constituye una solución original al tema de los residuos sólidos de la purificación de salmuera. El procedimiento convencional y de uso general de eliminación de los cationes no alcalinos de la salmuera consiste en la precipitación alcalina de los mismos, en forma de hidróxidos o carbonatos, que, por sus características floculantes, son difícilmente separables y forman unos lodos o barros residuales, contaminados con mercurio. Desde siempre, esos lodos han venido requiriendo costosos tratamientos energéticos; para separar el mercurio de los mismos con concepción radicalmente distinta, IQI ha desarrollado un proceso SAMEX que purifica la salmuera por extracción selectiva de los cationes no deseados, también en operación líquido-líquido, originando una solución residual de los mismos, de pequeño volumen, que no contiene mercurio y por ello puede ser desechada sin problemas. Este proceso permite, con una inversión igual a la del procedimiento convencional, e inferior a la resultante de añadir la instalación de purificación de los lodos, lograr eliminar las emisiones de mercurio, al mismo tiempo que conseguir grados de purificación de la salmuera superiores en un grado de magnitud a los logrados por el procedimiento convencional.

Para ello, IQI ha superado los problemas que plantea la extracción selectiva de cationes existentes en concentración 2000 veces inferior a otro (el alcalino), sin que la extracción inevitable de este último haga inviable el proceso. Ambos procesos están en operación industrial en tres plantas de producción de cloro en España. (Enrique Hermana.)

Micenas y los dorios

Alrededor del año 2000 a. C., cuando en Egipto se está iniciando el Imperio Medio, mientras en Mesopotamia los sumerios realizan su llamada "Restauración", entran en Grecia gentes nórdicas que no irrumpen de manera muy conspicua, que no llevan consigo ni arreos especialmente vistosos ni testimonio alguno de una cultura llamativa. Y sin embargo, habían de dejar en el país que estaban invadiendo, por lo pronto, una lengua nueva, que no había de ser la de los pelasgos, como los griegos llamaban a sus más remotos aborígenes, y tampoco la de los cretenses, sino un griego muy arcaico, mil años más antiguo que el de Homero y más difícil de comprender que el de éste, pero al fin y al cabo, griego, el griego que hoy llamamos micénico, porque Micenas fue para Homero la capital primitiva de la Grecia continental e insular. En Micenas reinaba Agamenón, y aunque había otros muchos reyes como él, cada uno con su sede respectiva, Agamenón detentaba una especie de hegemonía sobre todos ellos: era un *primus inter pares;* en una sociedad de reyes, él era el rey de reyes.

Esta época la conocieron los griegos y la conocemos nosotros envuelta en una aureola legendaria, tal y como la epopeya y demás manifestaciones de la literatura griega –la tragedia, sobre todo– la refunden o se hacen eco de ella. De ella y de sus personajes. A todos éstos los conocemos con sumo detalle, a ellos, a sus mujeres y a sus hijos. Aquí –podemos decir–, aquí en Atenas vivió Teseo; allí, en Tirinto, padeció Heracles; allá, en Micenas, estuvo la casa de los hijos de Pelops, casa de muerte y desolación... Igual que los héroes, las heroínas –Medea, Fedra, Clitemnestra, Helena...–. No hay en el mundo gente más conocida, biografías más pletóricas, más llenas de peripecias, más dramáticas. Entes de ficción convertidos en prototipos de caracteres humanos por algunas de las mentes más preclaras que en el mundo han sido: Homero, Sófocles, Eurípides... Son los gloriosos fantasmas del pasado mítico de Grecia.

La penúltima generación de estos personajes se combate dividida en dos bandos en la Guerra de Troya. Los aqueos acaban con los troyanos, salvo algún caso esporádico como el de Eneas. Tras haber ido todos juntos, los vencedores se dispersan y retornan a sus hogares. Aquí los unos acaban normalmente sus días, o con lo que para héroes como Menelao y Helena era una terminación normal, a saber, haciendo el viaje a las Islas de los Bienaventurados; otros mueren de mala manera, como Agamenón, que es asesinado por su mujer y por el amante de ésta a poco de llegar a su casa. Pero de todas maneras, estas vidas son perfectamente claras, y tal como los autores antiguos las refieren, conocidas.

Pero en cambio, sus hijos son figuras a las que vemos muy bien de niños y de jóvenes –un Telémaco, el hijo de Ulises; un Orestes, el hijo de Agamenón; un Neoptolemo, el hijo de Aquiles– y después se nos esfuman. Llega un momento en que los perdemos de vista y nadie nos dice de forma convincente qué ha sido de ellos; o nos dicen unas cosas tan raras como que Telémaco se fue a vivir a la isla de Circe, que es como decirnos que pasó a un mundo mejor. Evidentemente los griegos no sabían qué había sido de la generación de muchachos que estaba en la flor de la vida en el momento en que todo aquel mundo había periclitado.

La humildad inicial de los aqueos se había tornado en opulencia y boato, la primera gracias a sus actividades bélicas y mercantiles, que llegaron a producir inquietud a los imperialistas hititas; el segundo merced a la adopción de la refinada civilización cretense, incluida la escritura. En un país sin oro un burgo como el de Micenas podía permitirse el lujo de sepultar en las tumbas de sus magnates los 18 kilogramos de alhajas que Schliemann desenterró y que hoy constituyen una de las atracciones del Museo de Atenas. Cierto que esa cantidad no es demasiado impresionante, comparada con los 28,650 kilogramos del tesoro de Caldas de Reyes (Pontevedra); pero los micénicos sabían sacarle al oro un gran partido, laminándolo y haciendo joyas muy planas –mascarillas, pectorales, diademas– en vez de acumularlo en los pesados torques y macizas pulseras de nuestros gallegos prehistóricos. Comoquiera que fuese, Homero consideraba que Micenas poseía oro suficiente para calificarla de *polýchrysos.*

Pero ni esas riquezas ni las pavorosas murallas de que rodearon sus ciudadelas libraron a los micénicos del calamitoso fin que el destino les había reservado. Llega un momento en que, sin que sepamos ni el cómo ni el por qué, sobreviene la catástrofe. Los palacios son asolados e incendiados; sus habitantes sucumben o emprenden la huida. La conmoción que afectó a Grecia y a todo el Próximo Oriente alcanzó tal magnitud, que con ella se inicia lenta y penosamente una nueva época. De no haberse conservado las técnicas de la cerámica y de la metalurgia, podría hablarse de un retorno a la prehistoria.

La culpa de semejante catástrofe ha solido cargarse en Grecia a la cuenta de los dorios, quienes al decir de los antiguos habían irrumpido entonces en el Peloponeso desde sus territorios de origen en el norte del país. Pero la historia está referida con una vaguedad (por supuesto, sin aludir a la destrucción de Micenas ni de ninguna otra fortaleza) y con un argumento que parece hecho ex profeso para legitimar una situación a la que nadie sabía cómo se había llegado. El argumento es el siguiente: Hyllos, hijo de Heracles, se refugia en casa de Aigimios, rey de los dorios, y es adoptado por éste. Sus descendientes, los Heráclidas, incitan a los dorios a recuperar bajo su mando el patrimonio de aquéllos y de esta manera conquistan el Peloponeso, tras una serie de peripecias, y se reparten por Laconia, Mesenia y Argos.

Otra historia muy distinta es la que relatan los anales orientales. Aquí, por una parte, los epígrafes de Ramsés III hablan de una invasión de Pueblos del Mar que, bajando por Palestina y sus costas, amenaza con arrollar a Egipto. Ramsés logra detener la avalancha, pero con muchas dificultades. Este mismo movimiento tiene todas las trazas de ser el mismo que según el Antiguo Testamento llevó a los filisteos a Palestina, a quienes acompañaban los cretenses, y es de tener en cuenta que estos pueblos eran portadores de una cerámica muy semejante a la micénica. Al tiempo que esto sucede, vemos que Chipre y Ugarit están amenazadas por la invasión de escuadras que acabarán con sus respectivos reinos; el imperio de los hititas se derrumba para no levantarse jamás, y los anales de Tiglat Pileser I nos dan el nombre de los autores de la hecatombe, los *muski,* probablemente los traco-frigios, unas feroces hordas de indoeuropeos que acabarán amoldándose a la civilización y constituyendo el futuro gran estado de Anatolia. He aquí, pues, a grandes rasgos, lo que nos dicen las fuentes orientales. Los dorios no figuran por parte alguna. Claro que si sus contingentes no eran tan numerosos como algunos presumen, y no participaron en la empresa de la invasión de Oriente, no tenían por qué figurar en estos anales.

Para conciliar los datos arqueológicos y epigráficos con la tradición del "Retorno de los Heráclidas" se ha supuesto, particularmente por obra de F. Schachermeyr, que la ruina del mundo micénico fue producida por los Pueblos del Mar, encabezados por los filisteos. Esta acción dejó muy pocos vestigios en la leyenda y además se vio oscurecida por la dispersión de los aqueos al final de la Guerra de Troya. Entonces es cuando los dorios aparecen en escena para llenar el vacío que la diáspora había dejado en el Peloponeso (siglo XI antes de Cristo).

Según una vieja tesis de J. Beloch, los dorios se encontraban ya en el Peloponeso en época micénica. Esta tesis la hace ahora suya J. Chadwick apoyándola en argumentos lingüísticos, que dejan entrever a los dorios como uno de los componentes básicos del sustrato micénico. Según Chadwick, la lengua culta o "standard" de los palacios, contaminada de fuertes elementos minoicos, se hallaba superpuesta al dialecto "substandard" de las clases inferiores de aquella sociedad. Los indicios que de esa lengua se filtran en las tabletas por obra de los escribas, permiten atisbar los gérmenes del dórico. Cuando la catástrofe de hacia 1230 a. C. liquidó el sistema económico-social que giraba en torno a los palacios, el micénico "standard" pervivió en Arcadia y en Chipre, mientras que el "substandard" se reafirmó como dórico en otras regiones al emanciparse de la opresiva dominación de la lengua cortesana.

De ser así todo esto, los dorios quedarían libres de culpa o complicidad en la ruina del mundo micénico. Lo que más tarde poetizaron sobre ellos los griegos del primer milenio, desde Tirteo hasta Tucídides, fue un modo de redimir a los antepasados de los nobles defensores de las Termópilas de su modesta posición en la sociedad micénica, a la que entonces suministraban la mano de obra para las faenas agrícolas y la clase de tropa para el ejército. Heracles no fue más que un dorio maltratado por un déspota micénico; sus descendientes, los Heráclidas, los que se tomaron el desquite muchos años después, exactamente ochenta después de la Guerra de Troya, como

asevera Tucídides (I, 12) poco antes del 1100 a. C. (Antonio Blanco Freijeiro.)

Conducta social

Como ha escrito recientemente el prestigioso profesor Robert A. Hinde, biólogo de la Universidad de Cambridge, y una de las autoridades más destacadas de la moderna etología, la comprensión de la conducta humana entraña problemas infinitamente más complejos que el de poner a un hombre en la Luna o el de descifrar la estructura de moléculas complejas. La resolución de esos problemas resulta, además, de mayor importancia y apremio.

En el Parque Zoológico de la Casa de Campo de Madrid se están estudiando longitudinalmente cuatro especies animales diferentes; una manada de lobos ibéricos, *Canis lupus signatus,* una colonia de perritos de las praderas, *Cynomis ludovieianus,* un grupo de osos pardos, *Ursus aretos,* y una colonia de babuinos, *P. hamadryas, P. eynocephalus* e híbridos. Los animales que viven en sociedades se enfrentan a una serie de problemas que solucionan a través del recurso a estrategias sociales determinadas. El estudio de dichos problemas y estrategias en las distintas especies animales es de sumo interés para una comprensión objetiva de los mecanismos sociales. Cada una de las especies estudiadas presenta sistemas sociales de diferente complejidad. Por ejemplo, con respecto al grupo de osos pardos deben destacarse los mecanismos desarrollados por los miembros del grupo pertenecientes a una especie típicamente solitaria en su estado natural, al ser introducidos juntos en una instalación cerrada en la cual es imposible romper el contacto visual. Este estudio permite desvelar cuáles son los mecanismos necesarios para la vida en grupo, y sobre todo, si los mecanismos citados se pueden adquirir durante la ontogenia o si, por el contrario, son adquisiciones filogenéticas (innatas). Frente a la información aportada por estudios realizados a corto plazo con grupos reducidos de individuos, la obtenida por medio de estudios longitudinales (aquellos en los que cada individuo del grupo se somete a observación a lo largo de varias generaciones) de grupos compuestos por un elevado número de individuos es mucho más rica y útil, ya que nos permite conocer, no sólo la estructura social del grupo (organización en un momento dado), sino también la dinámica o cambio histórico (evolución de la estructura social a través del tiempo), así como la funcionalidad del cambio surgido y los factores que lo provocaron (causalidad).

Las distintas especies que componen el orden de los primates comparten características morfológicas, fisiológicas y conductuales. El estudio de los distintos tipos de sociedades primates, el de su evolución tanto filogenética como ontogenética, así como el de su causalidad y función aportan una serie de datos de interés esencial para el conocimiento de las sociedades humanas. En las últimas décadas se han multiplicado los estudios de comportamiento social llevados a cabo en grandes instalaciones o corrales de centros de primates y zoos modernos, al quedar demostrado que los elementos básicos de la organización social de los grupos de primates se encuentran también en aquellos grupos mantenidos en cautividad. Además, en tales investigaciones de libertad restringida, aunque se mantiene relativamente constante el entorno ecológico (o medio físico) se permite, sin embargo, la expresión y estu-

dio en su entera complejidad del otro factor moldeador de la organización social: el entorno o medio social en que crecen los individuos, de especial importancia en las sociedades primates. Podemos comentar brevemente ahora que el plantearse lo que es un hábitat natural de la especie en una época en la que la influencia del hombre sobre todos los ecosistemas ha sido destructora, o al menos ha producido grandes alteraciones, resulta un poco irrealista. Toda situación en que se estudie una especie o se investigue un problema es importante y puede proporcionar datos de interés. No hay que obstinarse en plantear si la información ha sido recogida en situaciones "naturales", puesto que éste es un término muy relativo, sino tratar de analizar la información obtenida en cualquier situación de forma objetiva.

La colonia de babuinos de la Casa de Campo de Madrid, que consta hoy de 63 individuos, comenzó a ser observada antes de 1972 en el Parque Zoológico situado en el Retiro. Los estudios sistemáticos se iniciaron a partir de julio del mismo año en que se inauguró el zoo de la Casa de Campo de Madrid, a donde fueron trasladados, además del grupo inicial del Retiro compuesto por individuos de las especies *P.hamadryas, P. eynocephalus* e híbridos, otras 14 nuevas hembras hamadryas. La unidad básica en las sociedades de la especie *P. hamadryas* es el "harem": se trata de "unidades de un solo macho" constituidas en general por un macho reproductor (el líder) y las hembras reproductoras con sus crías. Varios harenes de este tipo se asocian formando una unidad de organización de orden superior denominada "banda", que parece equivalente a la unidad básica de la especie *P. eynocephalus,* que es la "tropa". Ambas pautas de organización social parecen estar genéticamente determinadas en los machos, siendo aprendidas en las hembras, y constituyen una respuesta adaptativa directa a presiones selectivas de su hábitat de origen, principalmente cantidad de alimento y depredadores. Los híbridos de ambas especies presentan una estructura social intermedia entre las de las especies puras. Este tipo de material, raras veces encontrado, permite hacer investigaciones y posteriormente comparaciones y extrapolaciones sobre la evolución o filogenia de la conducta. Hay que recordar que el babuino es uno de los primates que más se ha utilizado para realizar analogías sobre la probable evolución de la conducta social del hombre primitivo, en base a los paralelismos o convergencia que encontramos en la actual organización social del balbuino de sabana y la probable de los homínidos, al tener que enfrentarse ambos al mismo problema: abandonar el bosque y penetrar en la sabana en donde abundan los depredadores y donde sólo una compleja organización social permitiría la supervivencia del grupo.

Los puntos fundamentales de estudio para el etólogo son: función, causalidad, ontogenia y filogenia. En el caso del estudio de las sociedades primates, y hablando de la función de las estructuras sociales observadas, existe suficiente literatura sobre estudios de campo que puede ayudar a interpretar ciertos datos que podrían explicarse únicamente en el contexto del hábitat natural en donde evolucionaron determinados rasgos morfológicos o de comportamiento. Sin embargo, la función de determinadas conductas o estrategias individuales sólo se puede comprender si se sigue la trayectoria de la vida de cada individuo considerado dentro de un complejo entorno social en el que se desarrolla; y ello sólo es posible mediante la realización de estudios longitudinales en los que se investigue la causalidad y la ontogenia de la conducta.

La organización social de un grupo de primates, así como los rasgos morfológicos de la especie, está adaptada a los requerimientos del nicho ecológico ocupado. Por otra parte, los miembros de una sociedad de primates muestran conductas que se adaptan a las normas del grupo. Ambos planteamientos son lógicos: en el primer caso, la selección natural eliminaría aquellas pautas de organización o rasgos morfológicos que no estuvieran adaptadas a las condiciones del entorno ecológico. Así, por ejemplo, en un entorno de sabana definido por determinados parámetros ecológicos, como son la escasez de alimentos y la dispersión de los mismos, se ha seleccionado en el género *Papio* una pauta de organización social que es el harén y un incremento en el dimorfismo sexual. En el segundo caso, la selección social reduce la posibilidad de que los individuos peor adaptados a la organización del grupo (al entorno social) se reproduzcan, disminuyendo por tanto la posibilidad de que sus rasgos "no adaptativos" se perpetúen.

Un fenómeno importante es el de la diversidad de los fenotipos sociales. Nos referimos a los que, empleando el sistema de valores humanos, se podrían calificar de "raros o desventajosos"; resulta esencial como vía de escape a través de la cual podría actuar positivamente la selección natural en el caso de que, al cambiar las condiciones, los fenotipos considerados en un momento como "normales" pasen a ser poco adaptativos.

Una implicación de interés de estos hechos es que la organización social de un grupo, como la conducta social de los individuos que la componen, son procesos dinámicos, no estáticos. Las continuas condiciones ambientales del medio determinan nuevos cambios en las pautas de organización grupal e individual. No existe un modelo de organización "normal", sino un modelo de organización "diferente" en cada caso, resultado de la adaptación a condiciones ecológicas y sociales definidas. Además, las sociedades animales, como las distintas especies de un ecosistema, atraviesan probablemente diferentes estadios de desarrollo y madurez hasta su desaparición. Por tanto, cada modelo de organización social, incluido el denominado "de desorganización", es simplemente una respuesta del grupo como un todo a las cambiantes condiciones ambientales. Del mismo modo, considerando el nivel del desarrollo individual, probablemente muchos aspectos de la conducta del individuo son más propios del estadio de desarrollo en que se encuentra que del propio individuo. En consecuencia, muchos de los rasgos de comportamiento de cada individuo van a cambiar, y ser determinados, por cada estadio de desarrollo que atraviese.

Recientemente, además, como indican nuestras propias observaciones y dos estudios todavía inéditos de los doctores Dunbar y Hausfater (comunicación personal), la organización de una sociedad puede cambiar por procesos internos que actúan con relativa independencia de influencias ecológicas. Por ejemplo, procesos demográficos, como nacimientos, muertes, maduración de individuos y migraciones, pueden cambiar la estructura y organización de una sociedad. Este mecanismo se relacionaría con lo que hemos mencionado anteriormente sobre los estadios de desarrollo grupal. Asimismo, procesos puramente sociales, de dinámica interna como por ejemplo las estrategias sociales o reproductivas de los diferentes individuos, pueden también afectar y moldear de algún modo el tipo de organización social.

Podemos afirmar, para concluir, que los individuos de una sociedad son los productos y los productores de la misma. Por tanto, cualquier forma o estudio de organización grupal e individual es la consecuencia de condiciones externas e internas al grupo, pero, desde luego, básicamente externas al individuo (no innatas). También es cierto que los individuos de cualquier especie están equipados filogenéticamente para dar una respuesta a las condiciones que encuentren. (Fernando Colmenares y Helena Rivero.)

Observatorio Einstein de rayos X

Este satélite, portador de un telescopio de rayos X de inaudito tamaño y sensibilidad, ha estado en órbita más de un año. Ha proporcionado nuevas e insospechadas perspectivas de los fenómenos de alta energía

Riccardo Giacconi

El lanzamiento, en noviembre de 1978, del *HEAO-2*, el segundo observatorio astronómico de alta energía, ha proporcionado a los astrónomos un telescopio cuya sensibilidad a los rayos X iguala a la de los instrumentos que operan en las regiones óptica y de radio del espectro electromagnético. El *HEAO-2*, también conocido como Observatorio Einstein, lleva un telescopio de rayos X de 58 centímetros que ha logrado registrar, en las longitudes de onda de los rayos X, todas las clases importantes de objetos astronómicos cuyas emisiones ópticas y de radio han podido ser detectadas por los mayores telescopios instalados en tierra. Con respecto a los primitivos detectores de rayos X transportados por encima de la atmósfera por cohetes en 1962, este instrumento representa un avance tan grande en sensibilidad como el telescopio Hale de 5 metros del Monte Palomar representa sobre el telescopio de Galileo de 1610. En ambos casos, el aumento de sensibilidad ha sido, grosso modo, de un millón de veces.

Cada día, desde una órbita a unos 500 kilómetros sobre la superficie de la Tierra, el Observatorio Einstein registra las emisiones en rayos X de 10 a 12 regiones del cielo seleccionadas por el grupo de investigadores asignados a esta misión y retransmite las observaciones a varios grandes radiotelescopios que funcionan en diversas partes del mundo bajo la supervisión de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Finalmente, todos los datos se envían al Centro de Astrofísica del Harvard College Observatory y al Observatorio Astrofísico Smithsoniano en Cambridge, Massachusetts, que jugó un papel destacado en la creación del Observatorio Einstein y está a cargo de la distribución diaria de sus horas de funcionamiento. El grupo del Centro de Astrofísica ha puesto los servicios del observatorio a disposición de investigadores invitados de un buen número de países. El telescopio de rayos X del observatorio se puede apuntar con una precisión de un minuto de arco y proporciona una resolución en rayos X de unos cuatro segundos de arco, favorablemente comparable con la resolución de los telescopios ópticos montados en el suelo en condiciones medias de visibilidad.

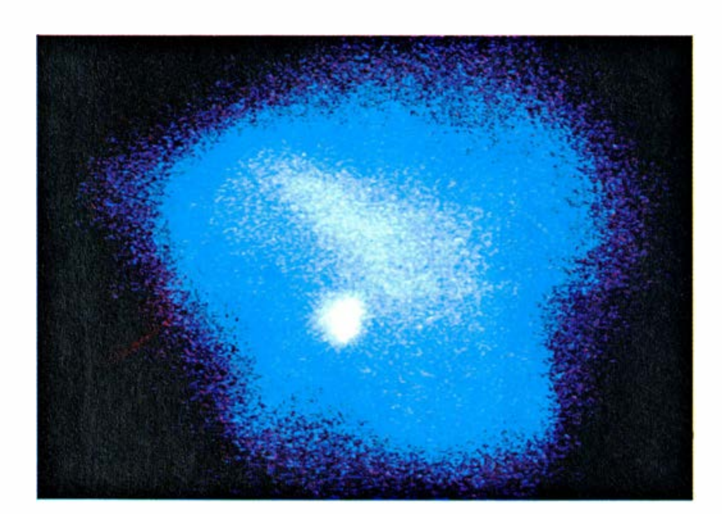
Durante su breve pero agitada existencia, el Observatorio Einstein ha examinado más de 3000 campos celestes. En cada campo se ha registrado al menos una fuente de rayos X; la inmensa mayoría de las fuentes se desconocían hasta entonces. El volumen de nueva información que se está recogiendo respecto a los rayos X en el cielo mantendrá a los astrónomos ocupados durante los próximos años. Los primeros resultados están ahora empezando a aparecer en la literatura científica.

Sería virtualmente imposible resumir las investigaciones en toda su rica variedad, de modo que me limitaré a algunos de los aspectos más salientes. El Observatorio Einstein ha puesto de manifiesto, por ejemplo, que las estrellas normales emiten bastante más radiación X de lo que se había previsto. Ha aumentado grandemente el número de sistemas binarios conocidos en los que se está traspasando masa de una estrella grande a una pequeña compañera ultradensa, que puede ser una estrella de neutrones o un agujero negro. Allá donde los anteriores satélites de rayos X habían podido detectar solamente un manojo de fuentes de rayos X en galaxias distintas de la nuestra, el telescopio de rayos X del Observatorio Einstein ha descubierto más de 80 fuentes de rayos X sólo en una galaxia: la Gran Nebulosa de Andrómeda (Messier 31 o M31). Cuando el instrumento se ha dirigido a cúmulos de galaxias, ha proporcionado sorpresas respecto a la manera como el gas emisor de rayos X está distribuido en el espacio intergaláctico. En un caso extremo, el gas está distribuido más o menos al azar, como en amontonamientos; en el otro caso está concentrado cerca del centro del cúmulo y desde allí se atenúa suavemente en todas las direcciones. La distribución del gas revelada por los rayos X suministra por tanto una manera de clasificar cúmulos que no era posible mediante las observaciones en otras longitudes de onda. El Observatorio Einstein ha registrado también emisiones de rayos X procedentes de los más distantes de los quasars conocidos, objetos parecidos a estrellas cuyos enormes corrimientos hacia el rojo indican que se están alejando a velocidades de hasta el 90 por cien de la de la luz. De hecho, las observaciones procedentes del observatorio indican que la mayor parte, si no toda la radiación X de fondo, proviene no de gas caliente y difuso, como se había supuesto, sino de quasars demasiado distantes para poder registrarlos individualmente.

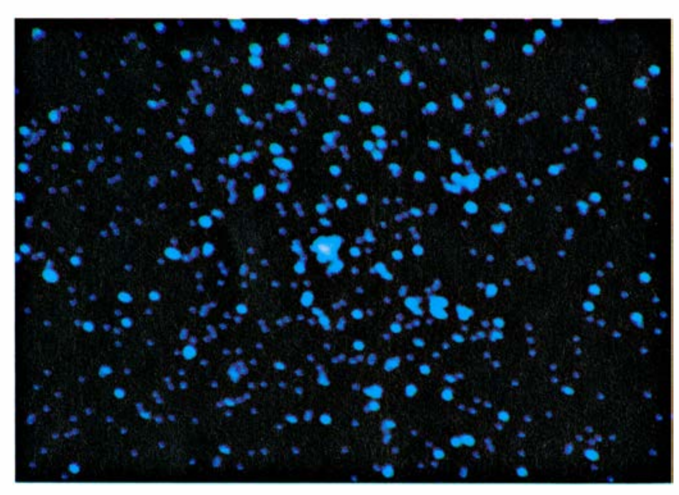
El dinámico nuevo universo

Muchos de los más notables descubrimientos sobre el universo, obtenidos en los últimos decenios, se han logrado a partir de observaciones de radiación no visible. Los radiotelescopios revelaron primero la existencia de quasars y de la radiación de fondo universal en la banda de microondas. Esta última radiación aporta la prueba más convincente en favor de la teoría de la "gran explosión" sobre la formación del universo, aparte de la recesión de las galaxias. Las radioobservaciones condujeron también al descubrimiento de los pulsars, considerados como estrellas de neutrones en rápida rotación. Tales objetos se habían previsto teóricamente como el punto final de la evolución estelar de estrellas de masa intermedia. Con la ayuda de detectores de infrarrojos montados en telescopios ópticos, los astrónomos han detectado la emisión procedente de objetos que están en el centro de nuestra galaxia pero quedan totalmente ocultos por el polvo en las longitudes de onda visibles.

RESTO DE SUPERNOVA en la constelación Casiopea, Cas A, del que se construyó una imagen de alta resolución con el telescopio de rayos X en el Observatorio Astronómico de Alta Energía 2 (*HEAO-2*), conocido también como Observatorio Einstein. La resolución del telescopio, de cuatro segundos de arco, es 1000 veces más alta que la resolución de los detectores de rayos X usados hasta entonces; el instrumento del Observatorio Einstein es también 1000 veces más sensible. La constelación de Casiopea tiene un diámetro de 5,5 minutos de arco. La imagen confirma que Cas A no contiene pulsar, estrella de neutrones en rápida rotación del tipo que se encuentra en otros restos de supernova y que es un intenso emisor de rayos X.



PULSAR EN LA NEBULOSA DEL CANGREJO, parte del resto de una supernova descrita por los observadores chinos en el año 1054 de la era cristiana, que produjo la brillante mancha central en esta imagen registrada por el telescopio del Observatorio Einstein de rayos X. La nebulosidad dispersa alrededor del pulsar tiene unos dos minutos de arco en su mayor dimensión. La imagen está hecha a la misma escala que la de Cas A en la parte superior de esta página. Salvo indicación expresa en contra, las imágenes que figuran en este artículo fueron obtenidas por el grupo del autor (Riccardo Giacconi) en el Centro de Astrofísica del Observatorio de Harvard College y el Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Cambridge.



EL QUASAR MAS DISTANTE CONOCIDO, OQ 172, fue fácilmente fotografiado por el telescopio de rayos X. El grupo central de puntos fue producido por alrededor de 60 fotones del quasar. De acuerdo con las teorías actuales, los fotones fueron emitidos por el quasar hace alrededor de 15.000 millones de años. Rodeando a los puntos se ven sucesos de fondo. OQ 172 tiene un corrimiento hacia el rojo, designado por Z, de 3,53. Esto significa que la longitud de onda de la radiación electromagnética emitida por el objeto queda multiplicada por un factor de 3,53, el mayor corrimiento hacia el rojo conocido. Esta imagen fue preparada en el laboratorio de Astrofísica de la Universidad de Columbia a partir de datos del Einstein.

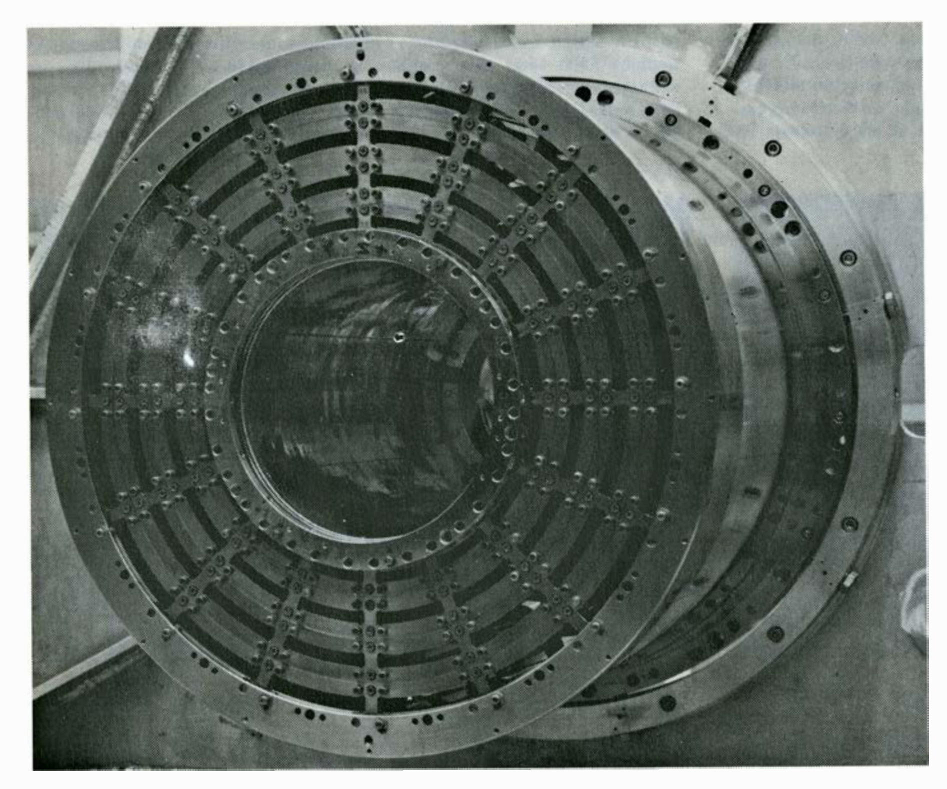
Con la llegada de los cohetes y satélites artificiales, ha sido posible transportar a gran altura instrumentos para registrar las emisiones de objetos celestes en longitudes de onda del ultravioleta y rayos X, las cuales serían absorbidas por la atmósfera terrestre.

Los propios astrónomos tardaron en darse cuenta de que las longitudes de onda invisibles al ojo podían contener importante información acerca del universo, pese a que sabían perfectamente que ciertos procesos físicos naturales dan lugar a radiaciones características millones de veces más largas o más cortas que la radiación visible. La radiación en los dominios visible e infrarrojo proviene de cambios en el estado energético de átomos y moléculas que implican solamente a los electrones más débilmente ligados. Tales radiaciones transportan la mayor parte de la energía emitida por cuerpos a temperaturas de unos pocos miles de grados, tales como el filamento de una bombilla incandescente o la superficie del Sol. Los cambios en el estado energético que afectan a electrones más fuertemente ligados dan lugar a radiaciones de energía creciente y longitud de onda cada vez más corta, desde radiación ultravioleta a rayos X. Las substancias a temperaturas de millones de grados emiten la mayor parte de su energía en forma de rayos X, y sólo una fracción despreciable de ella a longitudes de onda visibles. Los rayos gamma, cuya longitud de onda es todavía menor que la de los rayos X, se originan en procesos físicos que llevan consigo cambios en el estado energético del núcleo atómico. En el otro extremo del espectro, las longitudes de onda que se extienden desde la región del infrarrojo pasando por las microondas hasta alcanzar las ondas de radio más largas, se producen cuando las trayectorias de electrones libres de alta energía son desviadas por campos magnéticos o cuando átomos o moléculas individuales saltan de un estado de mayor energía a otro de energía más baja.

La consecuencia de la observación del universo a través de esas varias "ventanas" espectrales durante el pasado cuarto de siglo ha sido una profunda revolución en la astronomía. Se sabe ahora que en el universo, por lo general, los procesos violentos son la norma más bien que la excepción en la evolución de estrellas y galaxias. Este nuevo punto de vista contrasta marcadamente con el que había prevalecido anteriormente. Según éste, el universo estaría lleno de galaxias que giraban majestuosamente y evolucionaban lentamente en el curso de miles de millones de años al mesurado paso de los procesos de combustión nuclear en la parte central de las estrellas.

Para citar un ejemplo de cómo ha cambiado este punto de vista, el estudio de las supernovas ha mostrado que aunque una estrella radia solamente un pequeño porcentaje de su energía total correspondiente a su masa en reposo en el curso de su evolución, puede liberar la mayor parte de la energía restante dentro de los pocos segundos de duración de un brusco colapso gravitatorio. Muchos de los elementos pesados que se hallan en el universo y en el sistema solar (incluyendo los elementos metálicos de nuestros propios cuerpos) deben haber sido creados por nucleosíntesis en los segundos que preceden a un colapso. Los elementos pesados son parte de la capa exterior que es violentamente proyectada hacia el espacio por la estrella moribunda y dispersada en el medio interestelar. Calentados hasta altas temperaturas por esa materia eyectada, los gases del medio interestelar emiten rayos X copiosamente, y así lo hace también el resto estelar colapsado que ha quedado atrás: un pulsar. Siempre que se produce un tal proceso explosivo, los gases se calientan hasta temperaturas muy elevadas y los electrones y protones son generalmente acelerados hasta energías muy altas. La mayor parte de la radiación emitida por gases calentados entre 10 millones y 100 millones de grados Kelvin se encuentra en la región del espectro correspondiente a los rayos X. Las partículas de alta energía emiten rayos X por interacción con campos magnéticos o fotones (los cuantos de la radiación electromagnética).

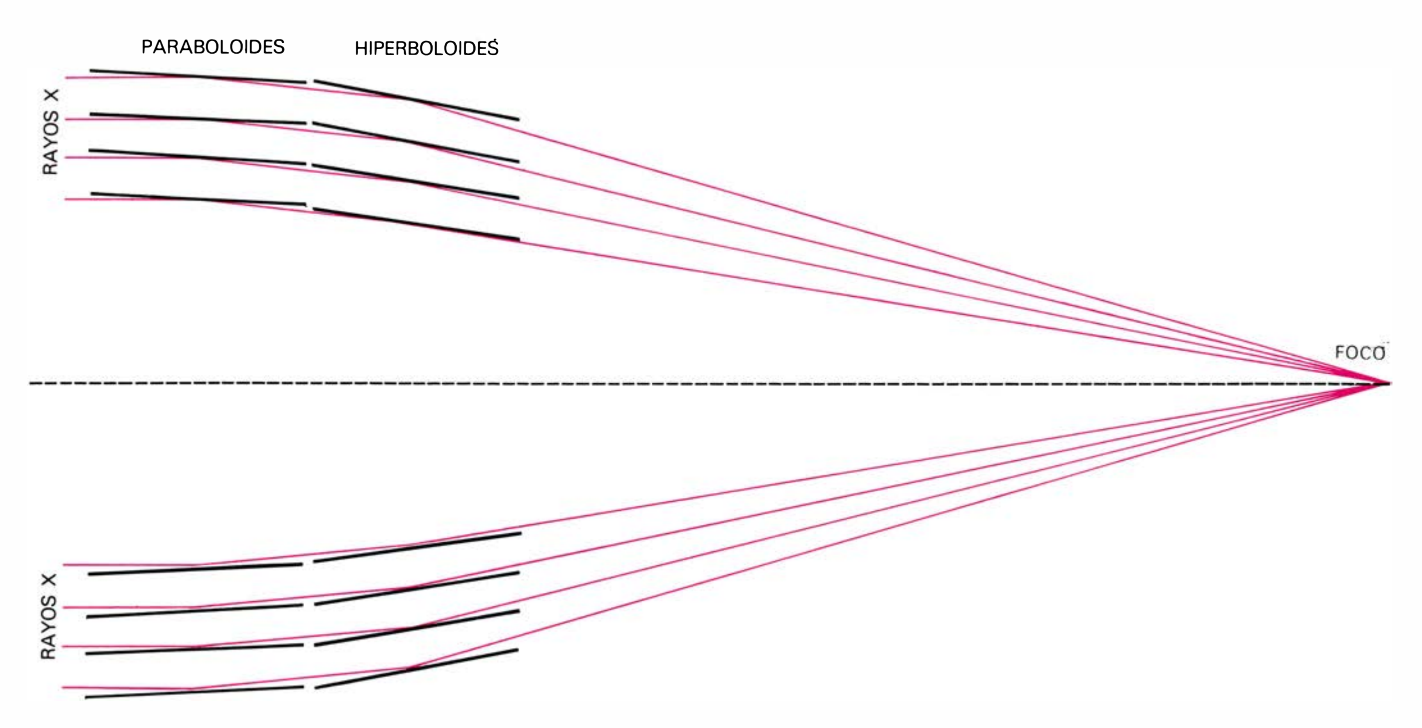
En resumen, los sucesos de alta energía predominan en la dinámica y evolución del universo. Cuando tienen lugar tales sucesos, se produce emisión de rayos X. Por tanto, para adquirir conocimientos acerca de los procesos dinámicos y explosivos en el universo, el astrónomo debe aprender a observar los rayos X.



TELESCOPIO DE RAYOS X del Observatorio Einstein. Dotado de una apertura de 58 centímetros, se trata del mayor instrumento de su clase jamás construido. Los fotones de rayos X penetran en el telescopio a través de los cuatro anillos segmentados y son focalizados tras dos reflexiones casi rasantes en superficies no esféricas [*véase la ilustración de la página opuesta*]. El instrumento fue construido por la Perkin-Elmer Corporation bajo instrucciones de Leon P. Van Speybroeck, del Centro de Astrofísica.

Historia de la astronomía de rayos X

La astronomía de rayos X trata con fotones cuyas energías caen en el dominio entre 100 y 100.000 electronvolt. (La energía de los fotones de la luz es de dos a tres electronvolt.) Como la atmósfera absorbe los fotones de los rayos X, la astronomía de rayos X tuvo que esperar el desarrollo de motores cohete capaces de elevar instrumentos por encima de la atmósfera. Cuando los vehículos necesarios estuvieron disponibles, la atención se dirigió primeramente hacia el Sol. Los rayos X solares fueron detectados en 1948 por T. Robert Burnright mediante un instrumento montado en un cohete. Posteriormente, Herbert Friedman y sus colegas, del Observatorio Naval de Investigación, usaron cohetes



FOCALIZACION DE LOS RAYOS X haciendo que se reflejen en superficies de forma especial a pequeños ángulos de incidencia. En un telescopio de rayos X, los rayos se reflejan primero en una superficie paraboloidal y después en una hiperboloidal. El telescopio del Observatorio Einstein tiene cuatro superficies paralelas de cada clase. Cada superficie ha sido formada y pulida a partir de un cilindro de vidrio de baja dilatación. Las superficies se recubren con una fina película de níquel. La distancia focal del telescopio es de 3,4 metros; su área máxima de recepción efectiva es de 300 cm².

para seguir la emisión solar de rayos X a lo largo de un ciclo completo de manchas solares, esto es, 11 años. El grupo de Friedman trató de detectar la emisión de rayos X procedente de estrellas distintas del Sol, pero fracasó. El fracaso no era inesperado: se había hallado que el Sol emitía sólo una millonésima parte de su energía total en forma de rayos X. Si el ritmo de emisión de rayos X hubiera sido aproximadamente el mismo para todas las estrellas, el flujo de rayos X por encima de la atmósfera terrestre habría sido demasiado débil para su detección con los instrumentos que había entonces.

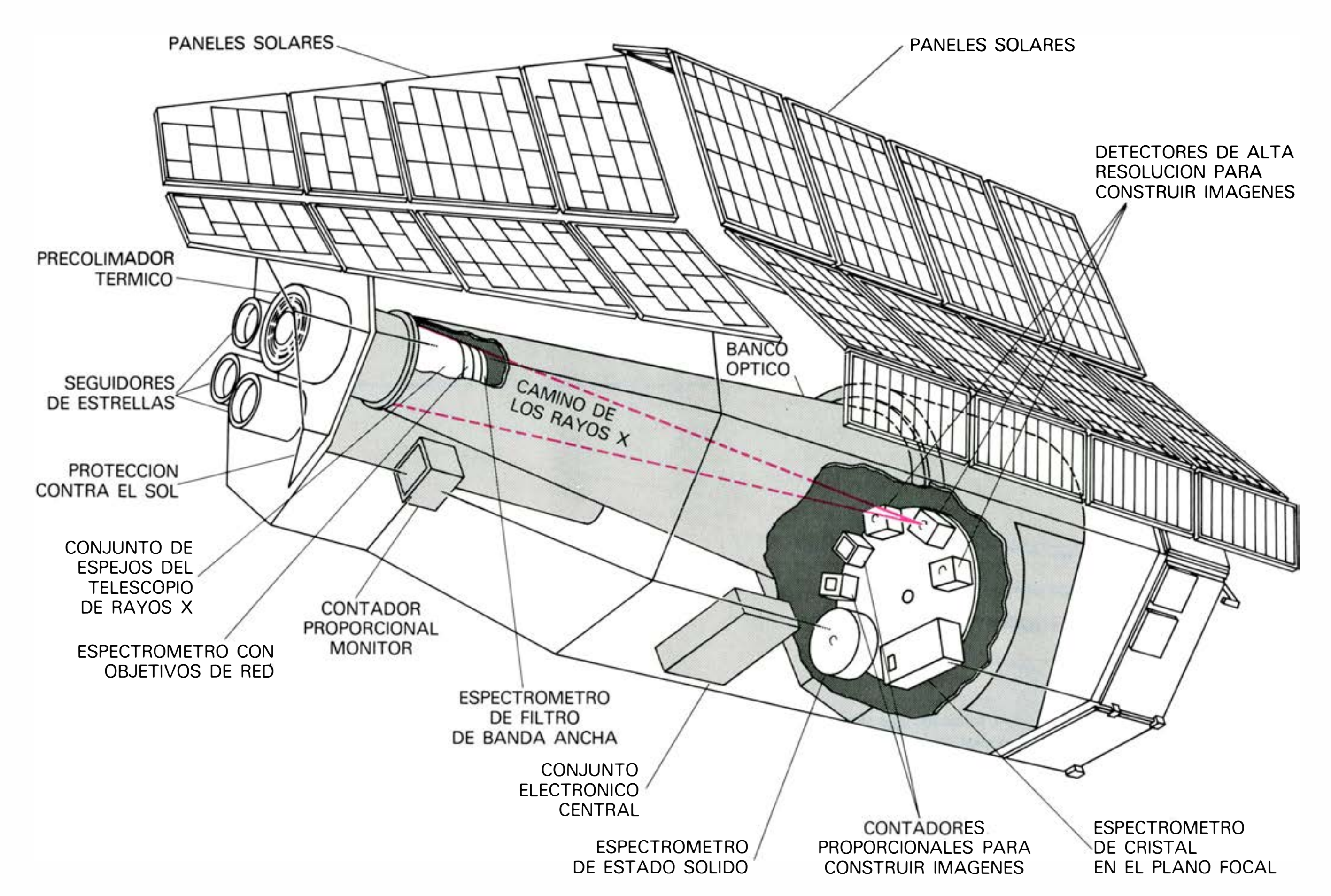
Pero existía el convencimiento creciente de que las observaciones de rayos X podían proporcionar una ventana nueva y potencialmente prometedora para la exploración del universo. Por consiguiente, varios grupos se dedicaron a mejorar los detectores de rayos X existentes. Nuestro grupo de la compañía American Science and Engineering, Inc., que incluía a Herbert Gursky y Francis R. Paolini, logró en 1962 desarrollar un detector con una sensibilidad cien veces superior como resultado de un programa de investigación que yo mismo había iniciado en 1959 siguiendo una indicación de Bruno Rossi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Después de dos lanzamientos de cohetes con el nuevo instrumento que no tuvieron éxito, nos cupo la suerte de descubrir, en junio de 1962, la primera fuente de radiación X fuera del sistema solar, una estrella en la constelación del Escorpión que denominamos Sco X-1.

Con mirada retrospectiva vemos hoy que la naturaleza fue amable con nosotros. Aunque las predicciones pesimistas acerca del flujo de rayos X emitido por las estrellas semejantes al Sol parecían ser correctas, habíamos descubierto el primero de una nueva clase de sistemas estelares en los que la emisión de rayos X excedía a la emisión de luz visible en un factor de mil. En años subsiguientes, los vuelos de cohetes lanzados por muchos grupos, incluyendo los del Laboratorio de Investigación Naval, la Lockheed Aircraft Corporation y nuestro propio grupo de American Science and Engineering, confirmaron nuestros resultados iniciales, aumentaron la muestra de fuentes galácticas de rayos X hasta unas 30 y sirvieron para identificar las primeras fuentes extragalácticas de rayos X: M87, una galaxia elíptica gigante que es al mismo tiempo una poderosa radiofuente, y 3C 273, considerada antes como el primer quasar. Pese a esos tempranos éxitos, los instrumentos transportados por cohetes no podían estudiar las fuentes de rayos X en detalle suficiente para proporcionar indicaciones acerca de los procesos físicos responsables de sus potentes emisiones.

La solución del problema tuvo que esperar al siguiente paso importante en instrumentación, que fue dado con el lanzamiento en 1970 del *Uhuru,* primer satélite equipado para observaciones de rayos X. Nuestro grupo había estado trabajando en el proyecto y desarrollo de tal satélite desde que yo lo había propuesto a la NASA en 1963. El *Uhuru* fue el primero de una serie de satélites similares que proporcionaron la mayor parte de los resultados obtenidos en astronomía de rayos X en el decenio de 1970: el satélite *ANS* del grupo holandés, el *SAS-3* del grupo del MIT, el *Ariel* del grupo británico, *OSO-8, Copernicus* y finalmente, en 1977, el primero de la serie Observatorio Astronómico de Alta Energía: *HEAO-1*.

El primer observatorio de rayos X

Entre los más importantes descubrimientos del *Uhuru,* subsiguientemente confirmados y ampliados por otros satélites, se contaba la identificación de muchas fuentes de rayos X dentro de nuestra galaxia en forma de sistemas binarios, en los que los rayos X se emitían en el traspaso de masa del miembro mayor del par al más pequeño. En una serie de excitantes descubrimientos en rápida sucesión, se registraron pulsaciones regulares en dos fuentes: una en Hércules, Her X-1, y otra en Centauro, Cen X-3. El examen detallado del período de pulsación mostró que, en ambos objetos, el movimiento de la estrella emisora de rayos X alrededor de su compañera producía un corrimiento Doppler en la frecuencia. El estudio a largo plazo del pe-



OBSERVATORIO EINSTEIN, financiado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y construido por las empresas American Science and Engineering, Inc., y TRW Inc., y se lanzó el 13 de noviembre de 1978. Tiene 6,7 metros de largo, 2,4 metros de diámetro y pesa 3175 kilogramos. La altura de su órbita original era de 537 kilómetros. Un montaje giratorio situado en el punto focal del telescopio de rayos X lleva instrumentos que permiten hacer cuatro clases diferentes de observaciones y medidas. Las figuras que acompañan a este artículo se hicieron con los detectores de alta resolución para construcción de imágenes y con los contadores proporcionales. Los varios espectrómetros suministran información detallada sobre la energía de los fotones de rayos X. Las observaciones del vehículo espacial se programan desde el Centro de Astrofísica.

riodo reveló que la rotación de la estrella emisora de rayos X se iba haciendo más rápida, no más lenta. Este sorprendente hecho significaba que la energía de la emisión no podía provenir de la rotación, como ocurre en los pulsares. La única fuente plausible que quedaba para la energía era la energía gravitatoria liberada por la acumulación de materia de la estrella compañera sobre el objeto emisor de rayos X. La caída hacia dentro de materia podía también dar cuenta de la aceleración de la rotación.

La identificación de Her X-1 y Cen X-3 a longitudes de onda ópticas o visibles se hizo posible gracias a las localizaciones, más precisas, suministradas por el *Uhuru*. La combinación de las mediciones ópticas y de rayos X permitió deducir la masa del objeto emisor. A partir de la variación de la velocidad de rotación, se pudo calcular también el momento de inercia. La conclusión fue que el objeto emisor de rayos X era una estrella de neutrones, con una masa igual a una o dos veces la del Sol. Esta fue la primera medición directa de la masa de una estrella de neutrones.

En otro sistema, Cyg X-1, hallamos un compacto objeto que titilaba en escalas de tiempo muy cortas, de milisegundos, aunque sin pulsaciones regulares. De acuerdo con la identificación óptica del sistema, la masa del objeto emisor de rayos X podía estimarse en un valor grande, de seis masas solares. Al ser compacto el objeto y tener una masa demasiado grande para una estrella de neutrones, se conseguía la primera prueba sólida de la existencia de un agujero negro.

Desde esos primitivos descubrimientos, los astrónomos han llegado a la conclusión de que el traspaso de masa en los sistemas binarios constituye la fuente de muchos, quizá de la mayoría, de los sorprendentes fenómenos de alta luminosidad detectados por los satélites de rayos X. Las diferentes clases de fuentes de rayos X, pulsantes, explosivas y transitorias, todas parecen ser solamente manifestaciones diversas de una fuente de energía subyacente. Los sistemas en los que hay traspaso de masa sirven de exóticos laboratorios astrofísicos en los que puede estudiarse el comportamiento de la materia a densidades extremadamente altas, tal como se refleja en las propiedades de las estrellas de neutrones. Las variaciones orbitales observadas en los sistemas en que grandes masas se están moviendo a altas velocidades suministran también comprobaciones de teorías de relatividad general que son difíciles de llevar a cabo en sistemas más típicos.

Otro importante descubrimiento de gran alcance realizado a partir de las observaciones del *Uhuru* es que, en los cúmulos de galaxias, el espacio entre las galaxias está lleno de gas a temperaturas entre 10 y 100 millones de grados Kelvin. Tales cúmulos son los más grandes agregados de materia ligados gravitatoriamente que se conocen en el universo. Su origen y evolución continúan siendo un misterio. No se sabe, por ejemplo, si las galaxias se formaron primero y se reunieron después para constituir un cúmulo, o si existía ya una gran nube de gas como entidad discernible antes de que se formaran las primeras galaxias. Las observaciones de rayos X deben ayudar a resolver el problema. Aunque la masa de gas en un cúmulo es igual a la masa de todas las galaxias visibles que lo integran, se desconocía la existencia

del gas y sólo pudo revelarse a través de mediciones de rayos X.

Las observaciones mediante rayos X realizadas por la media docena de satélites desde el *Uhuru* de 1970 hasta el *HEAO-1* de 1977 ampliaron el catálogo de fuentes de rayos X galácticas y extragalácticas hasta más de 400. Sin embargo, la sensibilidad de esas observaciones todavía quedaba bastante por debajo de lo necesario para darse cuenta del verdadero potencial de la astronomía de rayos X. Los instrumentos colocados en órbita hasta ese momento podían estudiar sólo los sistemas más luminosos e insólitos en nuestra propia galaxia y únicamente las más próximas y potentes de las fuentes extragalácticas. Para que la astronomía de rayos X entrase a formar parte de la corriente principal de la investigación astronómica, se imponía que la sensibilidad de los instrumentos detectores de rayos X se multiplicase por un factor suficientemente grande para posibilitar el estudio de la emisión de rayos X procedente de un dominio de objetos mucho más amplio en nuestra propia galaxia y para extender la observación de rayos X de los objetos extragalácticos hasta los más distantes cúmulos y quasars hasta la fecha conocidos. A menos que se pudiera lograr tal mejora en la sensibilidad instrumental, quedarían sin respuesta una serie de urgentes preguntas acerca de la evolución estelar.

Focalizando la óptica de rayos X

Desde los primeros vuelos con cohetes en 1962 hasta el lanzamiento del *HEAO-1* en 1977, el detector básico de rayos X había permanecido inmutable. Era una versión contemporánea del venerable contador de Geiger, un tubo lleno de gas con una delgada ventana que impide el paso de los fotones visibles y ultravioletas, pero deja pasar los fotones de rayos X en el dominio energético que interesa. El detector era robusto, no difícil de construir y tenía la gran virtud de ser capaz de detectar cada fotón de rayos X incidente. Sus principales inconvenientes eran la falta de direccionalidad y un alto ruido de fondo debido a los rayos gamma y cósmicos. El problema de determinar la dirección de las fuentes de rayos X se resolvió mediante sistemas crecientemente complicados de reflectores que proporcionaban una resolución angular de medio grado cuando el detector se usaba para explorar todo el cielo. Se podían lograr resoluciones angulares más altas, hasta de un minuto de arco, mediante aperturas especiales, pero solamente a expensas de una grave reducción en la sensibilidad. El problema básico persistía: cuando las observaciones están limitadas por el ruido de fondo, la sensibilidad aumenta únicamente en proporción a la raíz cuadrada del área del detector.

El *HEAO-1* era ya uno de los mayores satélites científicos nunca construidos: unos seis metros de altura, 2,4 metros de diámetro y un peso de 2700 kilogramos. Sin embargo, a causa de las limitaciones físicas en sus detectores de rayos X, a pesar de que tenían una superficie 50 veces mayor que la de los del *Uhuru*, eran sólo siete veces más sensibles. Para poder multiplicar por 1000 la sensibilidad de los instrumentos del *HEAO-1* se hubieran requerido detectores de varios cientos de hectáreas de superficie. Obviamente, lo que se necesitaba para seguir progresando era un instrumento basado en principios completamente diferentes. La importancia del Observatorio Einstein estriba en que aportó este nuevo gran avance tecnológico.

En otras regiones del espectro, tales como la óptica y la de radio, la sensibilidad se puede aumentar por el sencillo método de recoger mayor número de fotones y concentrarlos para formar una imagen. En los telescopios ópticos pequeños pueden usarse lentes de vidrio con ese propósito, pero éstas no funcionarían en la región de los rayos X, porque el vidrio absorbería la radiación sin focalizarla. En los mayores telescopios y en los radiotelescopios, el colector preferido es un reflector en forma de disco, pero esto también queda eliminado para los rayos X porque virtualmente ninguno de los rayos que inciden sobre un espejo perpendicularmente o con ángulos de incidencia pequeños es reflejado.

Sin embargo, en el decenio de 1930 se había descubierto que los rayos X se reflejan si se les deja incidir sobre una superficie lisa con ángulos de incidencia muy próximos al recto, fenómeno que se conoce como reflexión rasante. A principios del decenio de 1950 se estudiaron proyectos ópticos basados en la reflexión rasante, principalmente por Hans Wolter, de la Universidad de Kiel, quien trataba de desarrollar un microscopio de rayos X. Sus esfuerzos quedaron en último término frustrados por la casi imposibilidad de pulir pequeñas superficies no esféricas hasta tolerancias próximas a una milésima parte de la longitud de onda de la luz visible.

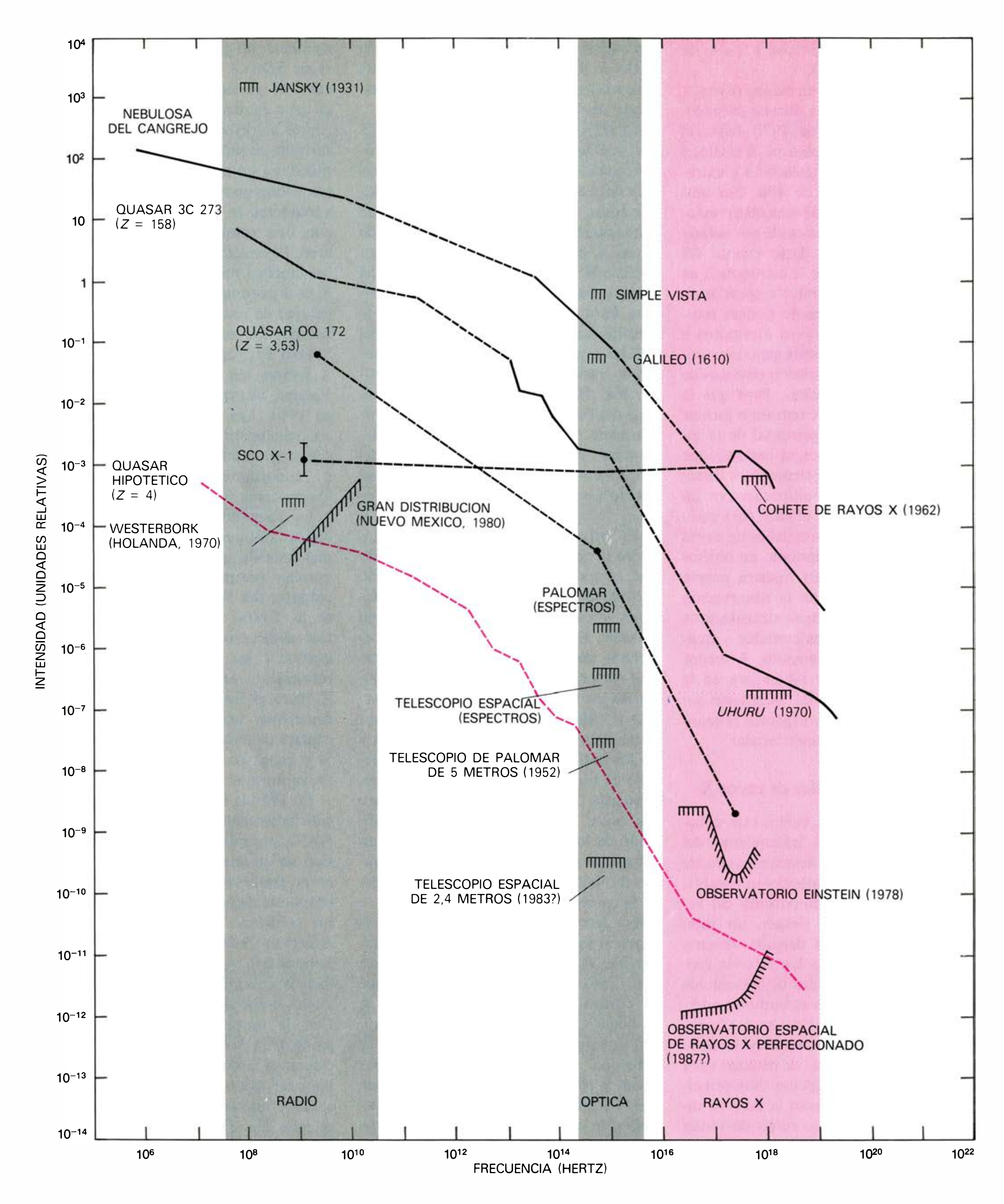
Por mi cuenta, yo había pensado en paraboloides de reflexión rasante en 1959, cuando por primera vez me preocupó la necesidad de mejorar la instrumentación de rayos X. En 1960, publiqué con Rossi un artículo sobre el valor potencial de la óptica de focalización en astronomía de rayos X. En el decenio siguiente, mi grupo en la empresa American Science and Engineering llevó a cabo el perfeccionamiento tecnológico en gran escala que perfeccionó los telescopios de rayos X. En cada paso del desarrollo pudimos probar nuestro instrumento en un programa de estudios solares. Obtuvimos las primeras fotografías verdaderas de rayos X del Sol en 1963, con una resolución de un minuto de arco. El programa culminó en 1973 con los muchos miles de imágenes de rayos X de la corona solar con cinco segundos de arco de resolución, que fueron tomadas por los astronautas de las misiones Skylab. El programa de cohetes de rayos X solares fue dirigido por Guiseppe S. Vaiana, incorporado en nuestro grupo en 1964. Las imágenes de rayos X de alta resolución del Sol permitieron a él y sus colaboradores realizar cierto número de importantes descubrimientos sobre los procesos físicos de la corona solar.

La observación del Sol con la nueva óptica rasante era considerablemente más sencilla que la observación de las estrellas, porque el flujo de rayos X procedentes del Sol, medido a la distancia de la Tierra, es enormemente mayor. Los telescopios solares podían ser pequeños y las imágenes, registrarse directamente sobre película para rayos X. Para el trabajo estelar tuvimos que desarrollar telescopios mayores y una cámara de televisión sensible a los rayos X y capaz de transmitir información a tierra durante varios años.

En 1970 la nueva tecnología estaba lo suficientemente desarrollada para que la NASA considerase seriamente la inclusión de un telescopio estelar de rayos X en el satélite-observatorio *HEAO-2*. La propuesta de tal misión fue realizada por un consorcio de cuatro instituciones: American Science and Engineering, el Laboratorio Astrofísico de la Universidad de Columbia, el Centro Goddard de vuelos espaciales de la NASA y el MIT. Con la aprobación del proyecto por parte de la NASA, y tras ocho años de esfuerzos como investigador principal para tal misión, mi sueño de 20 años atrás se realizó finalmente con el lanzamiento del *HEAO-2*, el Observatorio Einstein, el 13 de noviembre de 1978.

El Observatorio Einstein

El Observatorio Einstein es uno de los más avanzados vehículos espaciales que la NASA haya puesto hasta la fecha en vuelo. Está estabilizado según tres ejes y puede apuntarse a cualquier lugar del cielo mediante órdenes desde tierra. El vehículo espacial, junto con su sistema de energía solar, control de actitud, telemetría y funciones de mantenimiento



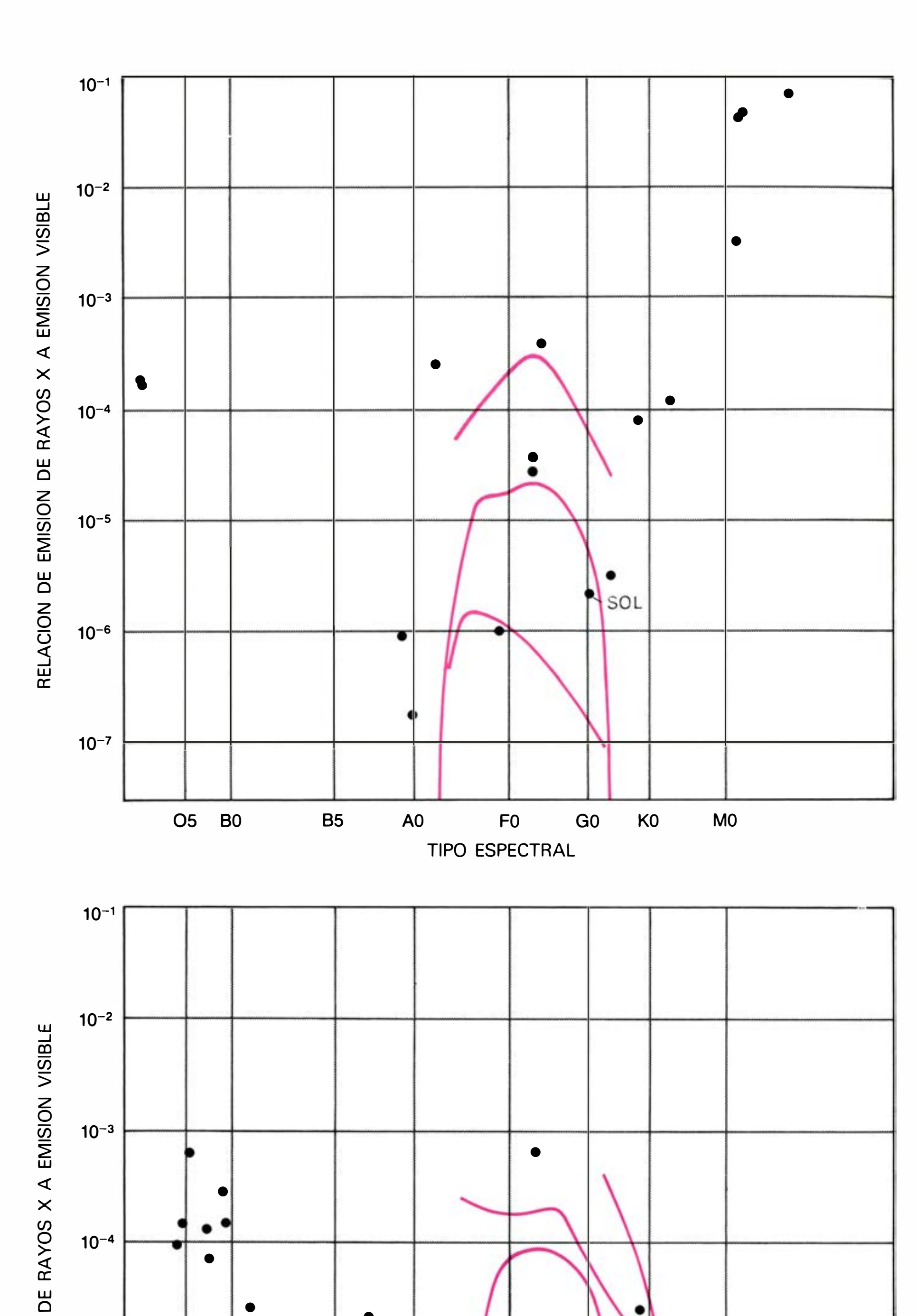
SENSIBILIDADES de los instrumentos astronómicos que operan en las diversas partes del espectro electromagnético. Esas pueden deducirse a partir de la comparación entre los mismos por lo que respecta a su capacidad de detectar radiación procedente de objetos astronómicos típicos. En general, los objetos representados aquí radian más energía por unidad de frecuencia en la región de radio del espectro que en la región de los rayos X. Las binarias de rayos X, tales como el Escorpión X-1 (Sco X-1), constituyen una notable excepción. El aumento de sensibilidad de los radiotelescopios desde el primer instrumento de Karl G. Jansky hasta el radiotelescopio Westerbork, de Holanda, y la Gran Distribución, de Nuevo México, es aproximadamente de un millón de veces. El perfeccionamiento de los instrumentos ópticos desde el telescopio de Galileo hasta el telescopio Hale de 5 metros de Monte Palomar viene a ser de la misma magnitud. Con el Observatorio Einstein, la astronomía de rayos X ha hecho un progreso comparable en sensibilidad desde las primitivas medidas en cohetes en 1962. Esta sensibilidad le ha permitido al telescopio de rayos X del Observatorio Einstein detectar el quasar (OQ 172) con el máximo corrimiento hacia el rojo (Z = 3,53) conocido. Un observatorio de rayos X más potente, ahora en proyecto, debe permitir registrar quasars con corrimiento hacia el rojo igual a 10, posiblemente fuera del límite de detección por el telescopio Hale. El espectro requerido para establecer el corrimiento hacia el rojo de tales objetos, cosa diferente de su detección, puede exceder la capacidad de un instrumento todavía más potente: el Telescopio Espacial de 2,4 metros, cuya fecha de lanzamiento está prevista para el mes diciembre del año 1983.

interno, fue construido por la empresa TRW Inc. bajo contrato con el Centro de Vuelo Espacial Marshall de la NASA. La totalidad del programa HEAO fue dirigida desde el centro Marshall por un grupo a las órdenes de Fred Speer.

El telescopio de rayos X del Observatorio Einstein consta de cuatro paraboloides en nido y cuatro hiperboloides en nido, que llevan los fotones de incidencia rasante a un foco situado 3,4 metros detrás de la apertura de entrada de 58 centímetros. Las limitaciones impuestas por la estructura en nido y por la placa frontal de soporte reducen el área máxima de captura a 300 centímetros cuadrados. El área efectiva de captura varía con la energía de los fotones, siendo máxima para fotones de 100 electronvolt y descendiendo hasta prácticamente cero para los de 4000 electronvolt. Cada una de las ocho superficies reflectoras se construyó a partir de un cilindro de vidrio de baja dilatación que se pulió hasta una milésima de la longitud de onda de la luz. Todos los elementos ópticos fueron construidos por la empresa Perkin-Elmer Corporation.

Dentro del satélite, un banco óptico alinea el telescopio con un conjunto de instrumentos de detección y medición de rayos X dispuestos en un montaje de revólver en el plano focal. Los instrumentos giran hasta la posición correcta ordenada. Los campos a explorar se seleccionan con la ayuda de sensores de estrellas, que también suministran el medio de comprobar la dirección en que apuntaba el satélite cuando exploraba el campo. Los sensores de estrellas fueron construidos por la Honeywell Inc. Gran parte de la instrumentación y de la estructura mecánica fue construida por American Science and Engineering bajo la dirección de mi grupo, que en 1973 se había trasladado al Centro de Astrofísica. Aunque la responsabilidad de la dirección científica general era mía, en calidad de investigador jefe, fue compartida con mi colega Harvey Tananbaum, el director del programa científico. Leon P. van Speybroeck, también del Centro de Astrofísica, merece gran parte del reconocimiento por lo que respecta al proyecto y fabricación de los elementos ópticos en el telescopio de rayos X, que es el mayor nunca construido.

El grupo del Centro de Astrofísica se responsabilizaba también de los dos instrumentos para obtener las imágenes de rayos X. Tananbaum, Stephen Murray, J. Patrick Henry y Edwin M. Kellogg desarrollaron una cámara contadora de fotones de rayos X capaz de detectar imágenes de rayos X a la totalidad de la resolución del telescopio (cuatro segun-



RELACION DE LA EMISION DE RAYOS X a la emisión visible. Esa razón se ha podido determinar por primera vez para una amplia variedad de estrellas a través del Observatorio Einstein. La clasificación espectral está correlacionada con la temperatura superficial de la estrella, variando desde 50.000 grados Kelvin para las estrellas O5 hasta 3600 grados para las estrellas M0. El Sol, con una temperatura de 5700 grados, es un miembro de la familia de las enanas y subenanas (*ilustración superior*). Las subgigantes, gigantes y supergigantes se ponen en una categoría separada (*ilustración inferior*). Las curvas suavizadas se basan en modelos estelares elaborados antes del lanzamiento del Observatorio Einstein. Los puntos muestran la variación de la relación de emisiones de rayos X y visible conocida ahora gracias a las mediciones del Observatorio Einstein. Las subenanas más frías que el Sol emiten en la región de rayos X casi una décima parte de la energía que emiten en radiación visible.

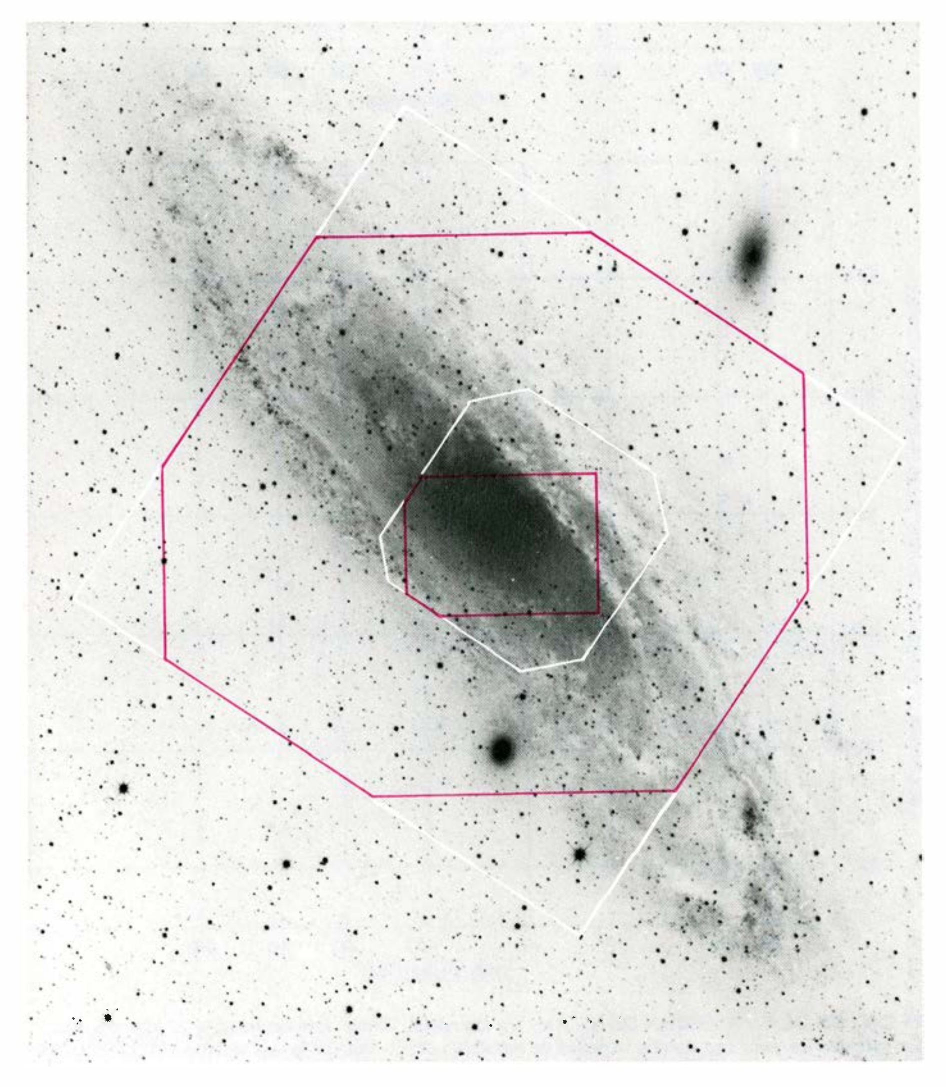
dos de arco) sobre un campo de 20 minutos de arco. La posición y tiempo de llegada de cada fotón detectado se transmite a tierra, donde se almacena en un ordenador. La cuenta de fotones acumulada durante un intervalo de tiempo, que varía de unos minutos a una hora o más, se traduce a una imagen de rayos X del cielo en una pantalla de televisión, que se fotografía entonces para producir imágenes de la clase que acompaña a este artículo.

Una segunda cámara de formación de imágenes, con un campo mayor (60 minutos de arco) y menor resolución (un minuto de arco), fue proyectada por Paul Gorenstein y Rick F. Harnden, del Centro de Astrofísica. La cámara usa un contador proporcional para medir, además de la posición y el instante de llegada, la energía aproximada de cada fotón detectado. Se toman también mediciones de energía más precisas mediante un espectrómetro de silicio de resolución media enfriado criogénicamente, que fue desarrollado por Elihu A. Boldt, Stephen S. Holt y Robert H. Becker, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard. La máxima resolución espectral, aunque inevitablemente a baja sensibilidad, está asegurada mediante un espectrómetro Bragg de cristal desarrollado por George W. Clark y Claude R. Cañizares del MIT. Un grupo de la Universidad de Columbia, formado por Robert Novick, Knox S. Long, William Hsin-Min Ku y David J. Helfand, tuvo a su cargo la mayor parte de la programación del ordenador y el análisis de datos. El planeamiento y la realización de la misión se llevaron a cabo bajo la dirección de Ethan Schreier, del Centro de Astrofísica.

Los datos del Observatorio Einstein se transmiten a las estaciones de tierra de la NASA en todo el mundo, y desde ellas a un centro de control en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard, en las afueras de Washington D.C., que funciona las veinticuatro horas del día con personal constituido por ingenieros del Goddard, TRW y Centro de Astrofísica. Una vez sacados los datos referentes a ingeniería, el resto de los transmitidos se envían al Centro de Astrofísica en Cambridge, Massachusetts, donde se ha desarrollado un eficaz sistema de manejo de datos en gran parte debido a Christine Jones, William Forman, Arnold Epstein y Jeffrey D. Morris. El flujo de datos se procesa ulteriormente y se halla la dirección a la que apuntaba el observatorio en función del tiempo, y las imágenes se van acumulando en el ordenador. Desde allí se pueden pasar a una pantalla de televisión.

Desde que se colocó en órbita el Observatorio Einstein, ha estado funcionando sin especiales dificultades, satisfaciendo todas las esperanzas respecto a resolución angular y sensibilidad. Ha detectado fuentes de rayos X mil veces más débiles que ninguna de las observadas con anterioridad y diez millones de veces más débiles que Sco X-1, la primera fuente detectada fuera del sistema solar. La sensibilidad del telescopio de rayos X es comparable a la sensibilidad óptica del telescopio de 5 metros del Monte Palomar, que es alrededor de cinco millones de veces más sensible que el ojo humano.

Formando parte de un programa patrocinado por la NASA y administrado en el Centro de Astrofísica por Frederick D. Seward, se ha ofrecido a astrónomos de todo el mundo la oportunidad de solicitar tiempo de observación en el Observatorio Einstein. En el primer año de funcionamiento se han cumplimentado más de 200 solicitudes. En lo que sigue describiré algunos de los primeros resultados.



NEGATIVO DE LA GALAXIA DE ANDROMEDA, M31, en el que se han delimitado dos áreas para las que el telescopio de rayos X del Observatorio Einstein ha construido imágenes. El área mayor delineada en blanco fue registrada por un contador proporcional productor de imágenes, que cubre un campo de 60 minutos de arco con una resolución de un minuto de arco. El área menor señalada en blanco, de 20 minutos de arco por lado, se registró con la máxima resolución del telescopio. Las áreas dentro de los límites en color se representan en las dos ilustraciones, superior e inferior de la página siguiente. La imagen óptica procede de la colección de placas del Observatorio del Harvard College.

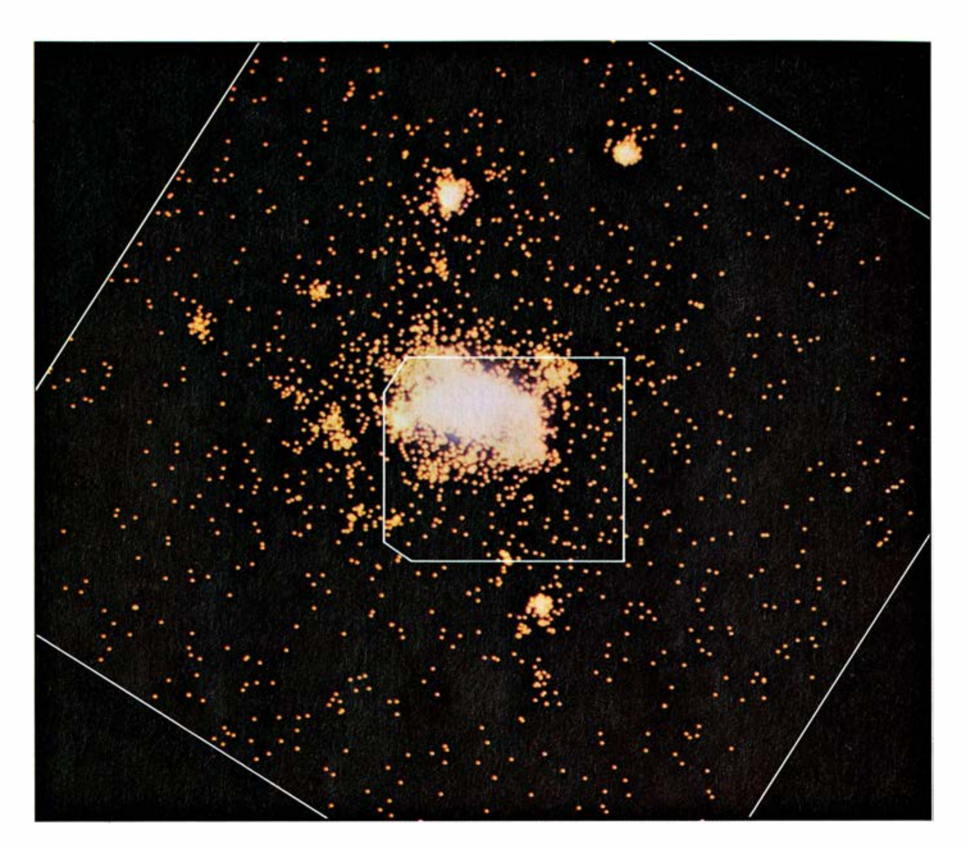
Coronas estelares

La gran sensibilidad del telescopio del Observatorio Einstein ha echado por tierra las ideas acerca de la emisión de rayos X procedente de estrellas dentro de la galaxia cuya luminosidad óptica era aproximadamente la misma del Sol. Antes de esta misión, se habían detectado rayos X procedentes solamente de un pequeño número de estrellas "especiales", tales como las binarias de rayos X, las enanas blancas y las enanas variables en novas cataclísmicas. El observatorio ha medido emisiones de rayos X procedentes de estrellas situadas en cualquier punto del dominio de color-magnitud, tal como se representa habitualmente en el diagrama Hertzsprung-Rus-

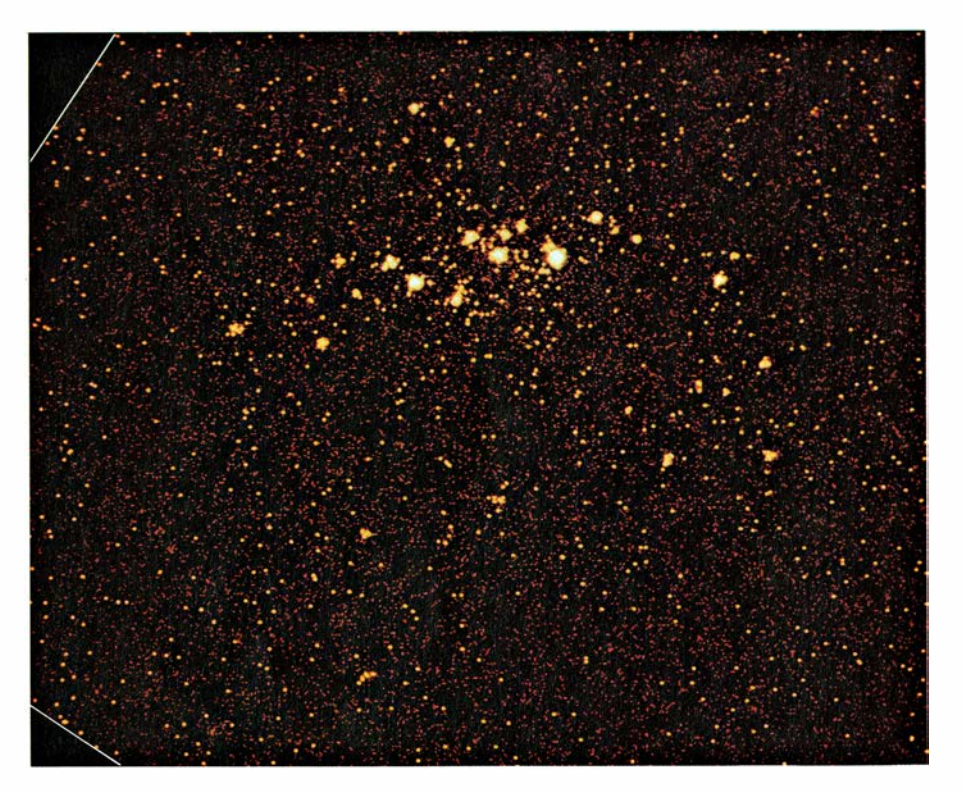
sell. Se han detectado ahora rayos X que vienen de estrellas cuyas temperaturas varían entre 3000 y 40.000 grados Kelvin (la del Sol es de 5700 grados) y cuyas magnitudes visuales en una escala absoluta van desde 10.000 veces más débiles que el Sol hasta 10.000 veces más brillantes. Las predicciones de emisión de rayos X basadas en las teorías clásicas del transporte de energía y el calentamiento de las coronas estelares, donde se cree que se originan los rayos X, son absolutamente incapaces de dar cuenta de las observaciones.

Tradicionalmente, el transporte de energía hacia el exterior del núcleo de una estrella se había venido considerando en función de dos procesos: la radiación y la convección. La convección, o burbujeo hacia arriba de materia fluida y caliente, es capaz de transportar grandes cantidades de energía. Se trata de un proceso acústicamente ruidoso, y se creía que la pérdida de energía acústica era el principal responsable del calentamiento de las coronas de las estrellas hasta temperaturas de un millón o incluso de 10 millones de grados, con la consiguiente emisión de rayos X. Sin embargo, la convección intensa se encuentra sólo en estrellas dentro de un margen relativamente limitado de composiciones y en fases particulares de la evolución de su desarrollo. En pocas palabras, las teorías tradicionales predecían que únicamente las estrellas comprendidas en un intervalo de temperaturas bastante estrecho, aproximadamente entre 5500 y 10.000 grados (correspondientes a los tipos espectrales designados G, F y A) emitirían rayos X a niveles comparables al del Sol o mayores que él.

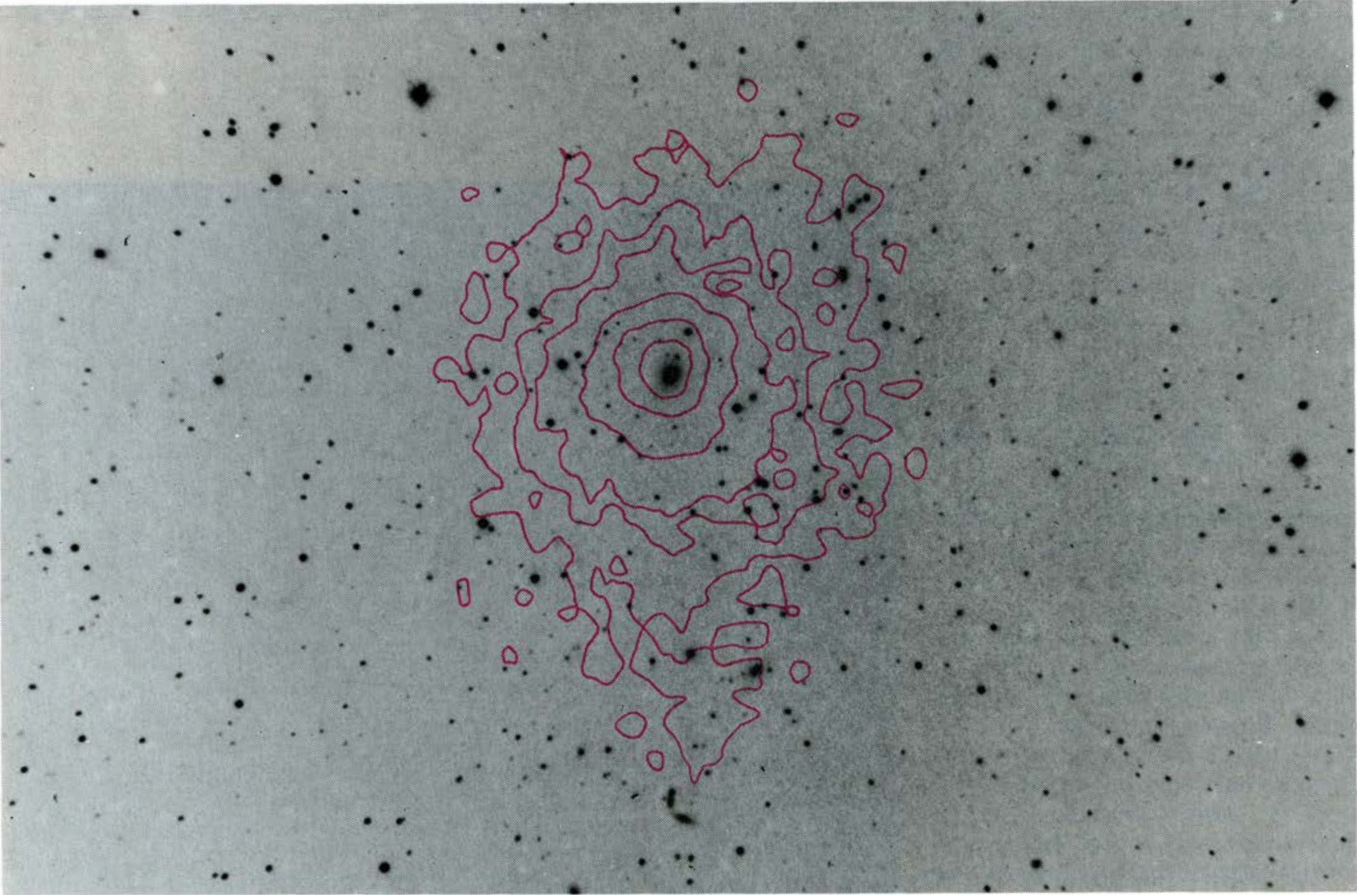
Habían surgido ya algunas dificultades a la hora de reconciliar la teoría de la convección con la emisión de rayos X del Sol. Como resultado, algunos teóricos solares habían sugerido como alternativa el posible papel de los campos magnéticos en el calentamiento de la corona solar. Además, los estudios ópticos y en el ultravioleta de estrellas con temperaturas comprendidas entre 15.000 y 50.000 grados (tipos O y B) y de ciertas enanas daba a entender que tales estrellas estaban rodeadas por una corona caliente. Los estudios basados en el Observatorio Einstein, emprendidos por los grupos del Centro de Astrofísica y de Columbia así como por investigadores invitados, están descubriendo ahora emisiones de rayos X procedentes de las estrellas calientes de clases O, B y A y de las enanas frías K y M [*véase la ilustración de la página 59*]. Para las enanas, la emisión observada es un millón de veces más potente que la prevista. Entre las estrellas M, la emisión de energía en la



TOMA DE M31 CON GRAN ANGULO; cuando se analiza en detalle, revela al menos 20 fuentes discretas de rayos X fuera del núcleo sobreexpuesto de la galaxia. La mayor parte de las fuentes se cree son similares a las estrellas binarias de rayos X que se encuentran en nuestra propia galaxia. Tales binarias constan de una gran estrella que está cediendo masa a una pequeña y densa compañera, bien una estrella de neutrones o un agujero negro. Los rayos X son emitidos por un disco de materia que se acumula alrededor de la compañera menor. (*Véase la ilustración de la página anterior, sobre esta galaxia.*)



VISTA DE M31 A PEQUEÑO ANGULO, que muestra el centro de la galaxia, región delineada en blanco en la fotografía de la parte superior de la página. El núcleo de la galaxia aloja alrededor de 18 fuentes discretas de rayos X. El número es sorprendente porque en el núcleo de nuestra galaxia se han detectado menos fuentes. La toma a este ángulo corresponde a la máxima resolución del telescopio.



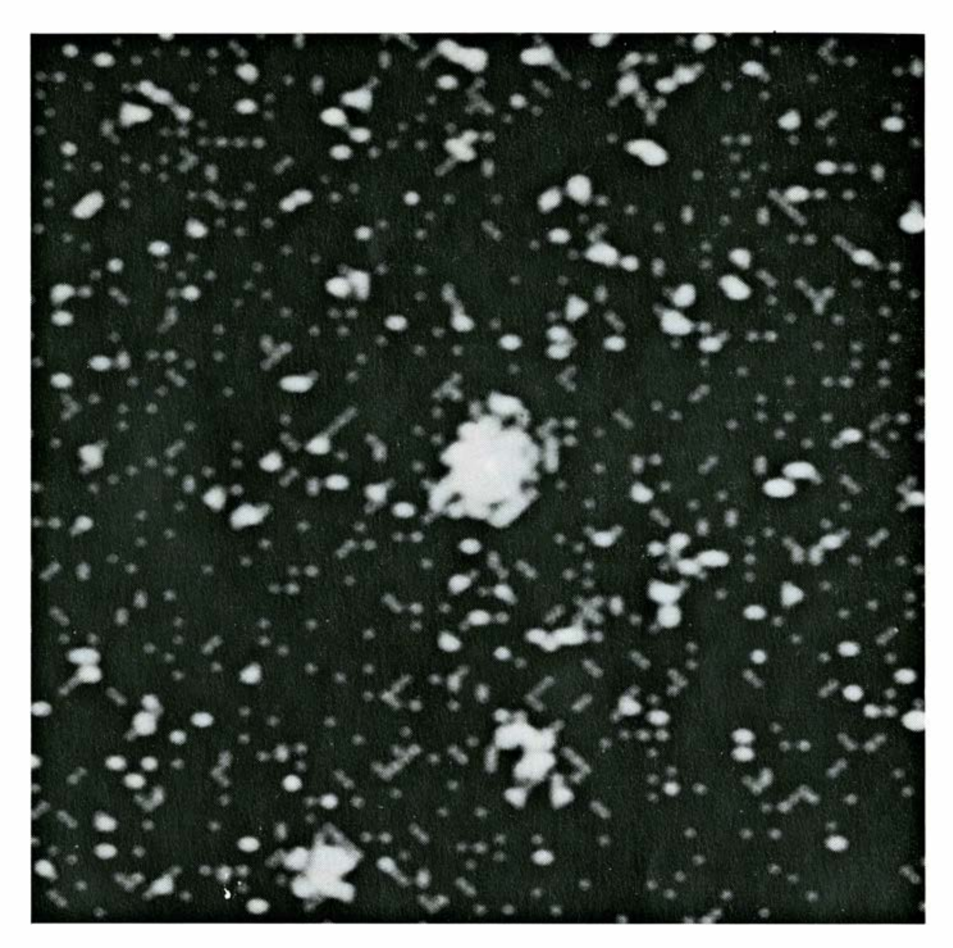
DISTRIBUCION DE GAS EN CUMULOS de galaxias, revelada por primera vez por el telescopio de rayos X del Observatorio Einstein. El primer satélite de rayos X, *Uhuru*, lanzado en 1970, descubrió que el espacio entre las galaxias en los cúmulos está impregnado de un gas a una temperatura de 10 millones de grados Kelvin. Las imágenes a alta resolución hechas ahora por el telescopio de rayos X del Observatorio Einstein muestran que en algunos de los cúmulos, tales como Abell 1367 (*arriba*), el gas (*en color*) está embolsado alrededor de las galaxias individuales o grupos de galaxias. En otros acúmulos, tales como el Abell 85 (*abajo*), más evolucionado, el gas se ha distribuido con mayor uniformidad, en respuesta al campo gravitatorio.

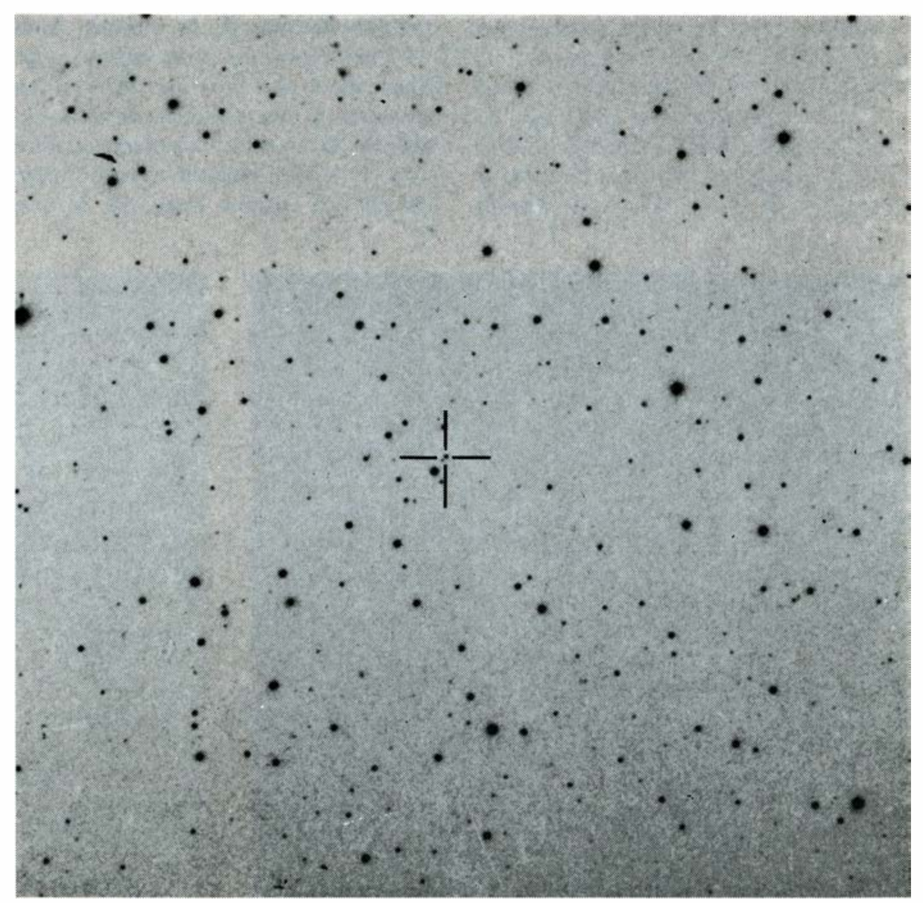
región de los rayos X se acerca a una décima parte de la emisión de energía en el visible, comparada con alrededor de una millonésima parte para el Sol. El importante descubrimiento general de Vaiana, W. Rosner y sus colegas del Centro de Astrofísica, esto es, que la emisión estelar de rayos X es la norma más bien que la excepción, obligará a una amplia reconsideración de las teorías tanto acerca de las atmósferas estelares como de la evolución estelar. Está claro que las observaciones de rayos X suministrarán importantes, y tal vez únicas, posibilidades de comprobación para cualquier nueva teoría al respecto que se proponga.

Restos de supernovas

Una explosión de supernova constituye el clímax de la evolución de una estrella masiva. Después de agotado el combustible nuclear de la estrella, la presión de radiación hacia el exterior es ya incapaz de equilibrar la fuerza gravitatoria hacia dentro. La región central de la estrella se colapsa, convirtiéndose en una estrella de neutrones cuya masa es igual a la del Sol pero cuyo radio mide sólo unos 10 kilómetros. La onda de rebote originada por el colapso se propaga hacia fuera, expulsando la capa exterior de la estrella a gran velocidad. La materia expulsada transfiere su enorme energía cinética al gas interestelar circundante, elevando la temperatura del gas hasta millones de grados. Mediante el estudio del núcleo colapsado y de la capa en expansión de una supernova es de esperar que puedan descubrirse detalles sobre la explosión misma. Se intenta también descubrir cómo se mezcla el gas interestelar con los detritus estelares y cómo éstos lo calientan. La totalidad del complicado proceso determina en último término la temperatura, composición y densidad del material básico a partir del cual se crean nuevos sistemas estelares comparables con el sistema solar. Antes del lanzamiento del Observatorio Einstein se habían observado varios restos de supernovas en longitudes de onda de rayos X. Los instrumentos del observatorio añaden una nueva dimensión a las primitivas observaciones a causa de su resolución de imagen, mucho más alta, y de su sensibilidad espectral, grandemente aumentada.

Una sensacional fotografía en rayos X del resto de supernova en Casiopea, Cas A, obtenida en el Observatorio Einstein por Murray y sus colegas del Centro de Astrofísica, aporta un ejemplo de la cantidad de detalle que nunca se había podido observar antes [*véase la*





ESTE QUASAR con corrimiento hacia el rojo de 3,1 es uno de los quasars más distantes de los que el telescopio del Observatorio Einstein ha obtenido imágenes. En la fotografía de rayos X (*arriba*), el quasar (QSO 0420-388) es el objeto más brillante. La imagen se obtuvo con la cámara de gran ángulo. En la fotografía óptica (*abajo*), hecha con el telescopio Schmidt de 1,2 metros del Monte Palomar, el quasar está indicado por un retículo. Los quasars quizá sean los objetos más lejanos conocidos.

ilustración superior de la página 53]. La imagen de rayos X está llena de detalles que corresponden a procesos físicos que acontecen simultáneamente en diferentes partes del resto. Las regiones más brillantes corresponden a burbujas de gases calientes moviéndose a alta velocidad, que se pueden observar también en las longitudes de onda de la luz visible.

Las burbujas parecen contener materia que se había enriquecido en oxígeno y azufre por procesos nucleares en el interior de la estrella y fue posteriormente expulsada por la explosión. Algunos rayos X parecen originarse en regiones estacionarias, posiblemente constituidas por materia expulsada de la estrella antes de la explosión y calentada después por el paso del frente de la onda de choque. Se puede también ver una tenue capa en la parte de fuera de las regiones más brillantes, que corresponde, según se deduce, al propio frente de la onda de choque que se mueve inmediatamente delante de los detritus en expansión. Los espectros detallados obtenidos por Holt y sus colaboradores del Centro de Vuelo Espacial Goddard con el espectrómetro de alta sensibilidad del Observatorio Einstein revelan la presencia de azufre, silicio y magnesio en la materia emisora de rayos X.

Se cree que Cas A es la supernova más reciente, aunque el suceso no ha sido reseñado en ninguna de las crónicas históricas conocidas. Sin embargo, su edad se puede estimar midiendo la velocidad a la que los detritus se mueven y calculando la época en la que habrían estado reunidos en un punto estelar. Cas A debe haber explotado en la segunda mitad del siglo XVII, considerablemente más tarde que la famosa supernova de 1572, vista por Tycho Brahe, y la supernova de 1650, descrita por Johannes Kepler. Es de esperar que cerca del centro del resto de cada una de esas supernovas se encuentre un pulsar, una estrella de neutrones en rápida rotación que fue lo que dejó tras de sí la estrella que había explotado. Sorprende que no se haya podido detectar pulsar alguno en ninguna de ellas, particularmente en Cas A. Como Cas A es joven, si se hubiera formado un pulsar en ella, la estrella de neutrones no habría tenido tiempo de alejarse del centro de la nebulosa en expansión. La ausencia de un pulsar implica o bien que no se creó estrella de neutrones en la explosión, o que la estrella de neutrones se enfrió más deprisa de lo que el actual conocimiento de la estructura de tales objetos permite predecir.

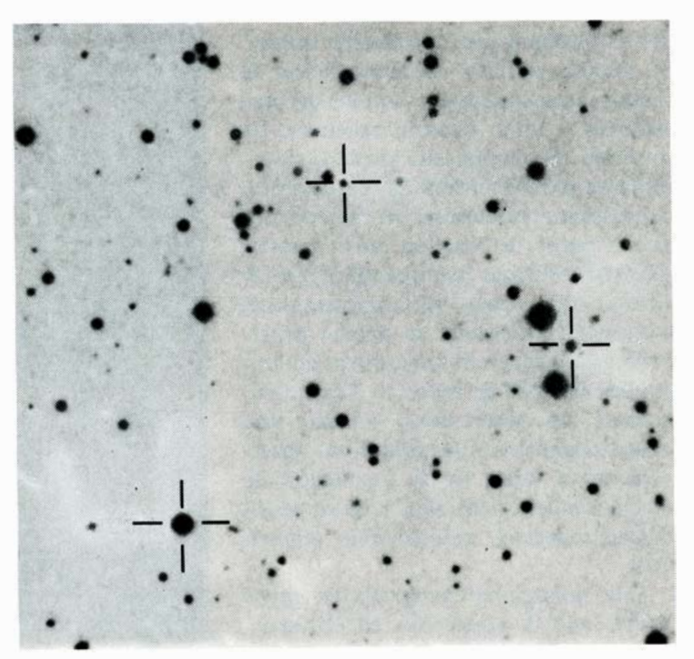
Fuentes extragalácticas de rayos X

La sensibilidad y resolución del telescopio de rayos X del Observatorio Einstein han permitido observar por primera vez fuentes individuales de rayos X en galaxias distintas de la nuestra. Antes del lanzamiento del observatorio, la galaxia espiral más próxima, M31 en Andrómeda, a una distancia de unos dos millones de años luz, solamente aparecía como una débil nube de rayos X representando la emisión integrada de unos 100.000 millones de estrellas. Con el telescopio de rayos X, Van Speybroeck y sus colaboradores del Centro de Astrofísica han encontrado en M31 al menos 80 sistemas estelares individuales, cada uno de los cuales emite más de 10^{37} erg por segundo de radiación. Estas fuentes resultan comparables, pues, con las más intensas fuentes de rayos X de nuestra propia galaxia.

En la imagen del telescopio de rayos X se advierte una clara distinción entre las fuentes asociadas a los brazos espirales de M31 y las fuentes en su región. Los brazos espirales son ricos en gas y polvo, de modo que han dado nacimiento a muchas estrellas jóvenes. También parecen favorecer la creación de sistemas binarios masivos que, con el tiempo, evolucionan a binarios de rayos X del tipo de transporte de masa. Por otro lado, en la región central de M31, las fuentes de rayos X son de un tipo distinto, presumiblemente sistemas binarios de pequeña masa formados por procesos de captura cuya probabilidad queda favorecida por la alta densidad de estrellas en la región. Sin embargo, ha sido una sorpresa encontrar muchas más fuentes de rayos X en el centro de M31 que en el centro de nuestra propia galaxia. El descubrimiento de la razón de tal diferencia deberá enseñar muchas cosas a los astrónomos acerca de los procesos de evolución en acción en los diferentes tipos de galaxias.

Existe una tendencia universal, todavía inexplicada, a la asociación gravitatoria de grupos de cientos o miles de ga-





DOS QUASARS Y UNA ESTRELLA similar al Sol produjeron las tres manchas más brillantes en la imagen del Observatorio Einstein, a la izquierda. Los tres objetos se han identificado mediante retículos en la fotografía óptica de la derecha, que se tomó con el telescopio de cuatro metros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile. El más brillante de los tres objetos es la estrella semejante al Sol. El quasar superior tiene un corrimiento hacia el rojo de 0,5, mientras que el inferior lo tiene de 1,96. Muchas de tales fuentes aparecen en las exploraciones realizadas mediante rayos X y constituyen una fracción importante de la radiación X extragaláctica de fondo. Se ha discutido mucho si ésta es o no difusa.

laxias en una región del espacio cuyo diámetro en muchos casos no es mayor que la distancia entre nuestra galaxia y M31. El *Uhuru* descubrió que el espacio entre tales cúmulos está impregnado de un gas a una temperatura de unos 10 millones de grados. Otros satélites hallaron una línea de emisión del hierro en el espectro de la radiación de varios cúmulos. Antes de la misión del Observatorio Einstein, los cúmulos de galaxias constituían la clase más grande de emisores extragalácticos de rayos X que se conocía.

Cúmulos de galaxias

Las observaciones de rayos X del Observatorio Einstein han abierto un capítulo enteramente nuevo en la investigación de cúmulos al revelar que un amplio dominio de formas de cúmulos se puede clasificar directamente a partir de las imágenes de rayos X referentes a la distribución de gas en ellos. La observación se extiende hasta los cúmulos más lejanos que se conocen a cualquier longitud de onda. El trabajo de Jones y sus colaboradores del Centro de Astrofísica indica que la distribución del gas en los cúmulos varía desde dispersa en bolsas a continua y concentrada. Ejemplos de dos casos extremos son Abell 1367, en el que el gas está en bolsas, y Abell 85, en el que el gas está concentrado cerca del centro y se atenúa suavemente con la distancia [*véase la ilustración de la página 62*].

La diferencia en la distribución del gas refleja presumiblemente los distintos estados de evolución de los dos cúmulos. El gas se origina evidentemente en las galaxias individuales y se difunde hacia fuera. En el caso de Abell 1367, el gas está todavía cerca del centro de la galaxia de origen, siendo retenido por el campo gravitatorio de la galaxia. En Abell 85, un cúmulo más antiguo, el gas y las galaxias han tenido tiempo de interaccionar entre sí, dando lugar a una distribución continua en la que la densidad del gas se adapta al potencial gravitatorio del cúmulo en conjunto. Las distribuciones intermedias del gas, y por tanto las fases intermedias de evolución, se observan fácilmente en las imágenes de otros cúmulos tomadas por el Observatorio Einstein. Uno de los intrigantes descubrimientos es que en cúmulos no evolucionados hay bolsas de gas caliente en lugares donde no puede verse galaxia alguna en las fotografías ópticas. No se explica cómo la masa subyacente puede tener una luminosidad tan baja que escapa a la detección.

Las observaciones de rayos X suministran una manera más directa y exacta de determinar la masa total de un cúmulo que ninguna de las que se pueden alcanzar a otras longitudes de onda. Los datos recogidos sobre una considerable muestra de cúmulos pueden conducir a un esquema de clasificación más cuantitativo, de manera que la formación y evolución de cúmulos se puede seguir hasta las fases iniciales en la evolución del universo. El cúmulo más distante conocido, que tiene un corrimiento hacia el rojo de 0,8 (esto es, una velocidad de alejamiento que aumenta la longitud de onda de la radiación emitida en un 80 por ciento), se puede detectar fácilmente por el telescopio de rayos X. Sin embargo, Henry y sus colaboradores del Centro de Astrofísica no han encontrado efectos claros de evolución en las imágenes de rayos X para corrimientos hacia el rojo de hasta 0,5.

Quasars

Cuando los instrumentos del Observatorio Einstein se apuntan hacia quasars, extienden la observación en rayos X a los objetos con el máximo corrimiento hacia el rojo conocido. El récord lo ostenta el quasar OQ 172, observado por Ku y sus colegas, que tiene un corrimiento hacia el rojo de 3,5. Si los quasars están tan alejados como su corrimiento hacia el rojo indica, son los más lejanos objetos observados hasta ahora. Como la luz que alcanza a la Tierra procedente de tales objetos distantes debe haber iniciado su camino en un pasado muy remoto, el estudio de los quasars suministra también una herramienta para investigar la historia del universo. Los instrumentos de rayos X disponibles antes del lanzamiento del Observatorio Einstein sólo podían detectar los rayos X procedentes de los tres quasars más próximos, con corrimientos hacia el rojo menores que 0,2.

El observatorio ha registrado ahora la emisión de rayos X procedente de cada uno de los quasars conocidos, para los que ha efectuado una cuidadosa comprobación de posición mediante los datos de rayos X. Además, tenemos la confianza de que en los más de 3000 campos observados hasta ahora por el observatorio, la emisión en rayos X que se registra procede de muchas fuentes remotas no identificadas ópticamente como quasars. Una selección de las fuentes de rayos X que se sospecha son quasars se está ahora examinando ópticamente para determinar sus corrimientos hacia el rojo y mediante ello decidir si son o no quasars. Hasta ahora, Tananbaum y sus colegas del Centro de Astrofísica han encontrado una correlación extremadamente buena entre la

emisión de luz visible por los quasars y la emisión de rayos X. Si esta correlación se combina con la prueba, suministrada por la exploración óptica, de que los quasars eran más numerosos en épocas primitivas de lo que son ahora, se puede llegar a la conclusión de que la contribución acumulada de los quasars antiguos es suficiente para dar cuenta del flujo integrado de fondo de radiación X procedente del exterior de nuestra galaxia. Las observaciones de rayos X pueden aportar, por tanto, comprobaciones decisivas de las teorías de la luminosidad y evolución de los quasars.

Las observaciones de rayos X deben también suministrar indicios sobre la naturaleza de la "máquina" escondida en el centro de los quasars que los convierte en los más poderosos emisores de radiación electromagnética del universo. Los quasars más distantes, por ejemplo, emiten solamente en rayos X tanta energía como la que emitirían 10^{14} soles a todas las longitudes de onda: 10^{47} erg por segundo. Como se sabe que los quasars varían apreciablemente en su intensidad de emisión óptica y de radio en menos de un año, su enorme emisión de energía debe originarse en un volumen de diámetro no mayor de un año-luz. Hoy se especula mucho sobre la posibilidad de que los quasars tengan en su centro un gigantesco agujero negro. La fuente de energía sería la energía gravitatoria liberada cuando las estrellas atraídas hacia él se hacen pedazos y son devoradas por el agujero negro. Cualquiera que sea la fuente real, los rayos X se deben formar mucho más cerca del centro del objeto que la radiación infrarroja o de radio. Esto se ha comprobado ya mediante la observación de grandes cambios en la intensidad de emisión de rayos X de los quasars en periodos muy cortos, de tres horas.

Radiación X de fondo

Los primitivos detectores de rayos X montados en cohetes pusieron de manifiesto que en el cielo existen no sólo fuentes discretas de rayos X, sino también un fondo de rayos X difuso. La uniformidad del fondo, particularmente para fotones de energías por encima de 2000 electronvolt, indica notoriamente que la mayor parte de la radiación se originó fuera de nuestra propia galaxia. Durante años ha sido objeto de conjetura saber si esta radiación es en verdad difusa, llenando todo el espacio, o si es la contribución acumulada de fuentes individuales demasiado débiles para poder resolverlas. Si la fuente fuese un gas tenue y caliente, como algunos investigadores habían especulado, se necesitaría tanto gas que su masa excedería la masa combinada de todos los otros componentes del universo. Si el universo tuviera una masa tan grande, la gravitación mutua de sus constituyentes acabaría por detener la expansión y posteriormente lo haría colapsar. Tal universo se llama cerrado.

Quizá esté en manos del Observatorio Einstein dejar la cuestión zanjada de una vez. Si la radiación X de fondo es mente difusa, por grande que fuera el aumento en sensibilidad y resolución angular de los instrumentos resultaría imposible discernir fuentes discretas; simplemente no las habría. Datos provisionales del observatorio, sin embargo, sugieren que su sensibilidad mil veces mayor que la de los instrumentos anteriores puede revelar fuentes individuales en lugares donde no se sabía que existiera ninguna. Por ejemplo, en una pequeña región del cielo que se creía "vacía", el Observatorio ha detectado tres fuentes de rayos X. Una se ha identificado en las placas ópticas con una distante estrella, parecida al Sol, de nuestra galaxia, y dos se han identificado con quasars que tienen corrimientos hacia el rojo de 0,5 y 1,9.

Extrapolando a partir de esta única región pequeña, se deduce que el número de fuentes débiles, aunque discretas, de rayos X puede ser muy grande, suficiente para dar cuenta al menos de una tercera parte de la radiación de fondo. Para una futura misión se está ahora proyectando un telescopio de rayos X más sensible que el del Observatorio Einstein, y debería ser capaz de detectar fuentes todavía más débiles y hasta explicar la totalidad de la radiación de fondo. En ese caso, la sola emisión de rayos X por los quasars podría identificar la emisión de rayos X integrada procedente de la totalidad del cielo. Si la explicase, el hipotético gas difuso que lo impregnase todo no existiría, haciendo menos probable que el universo fuese cerrado.

El Observatorio Einstein dejará de funcionar en la primavera de 1981, época en la que el rozamiento con la atmósfera lo desviará de su órbita. Está claro que sólo hemos empezado a recoger la rica cosecha de nueva información que nos llega a través de la ventana de los rayos X. Sobre la mesa de proyectos hay esbozados ya observatorios permanentes de rayos X más potentes que el Einstein. Si se cuenta con fondos, uno de ellos podría entrar en funcionamiento hacia 1987. El Observatorio Einstein ha demostrado claramente el inmenso valor de la investigación astronómica en la región del espectro correspondiente a los rayos X.

El parque de Yellowstone, ventana al interior de la tierra

Yellowstone es un "foco térmico" de la corteza terrestre. Su intensa actividad tectónica y volcánica hace de él un lugar único donde estudiar los procesos que se originan en zonas profundas de la tierra

Robert B. Smith y Robert L. Christiansen

El Parque Nacional de Yellowstone forma parte de la región con mayor actividad sísmica de las Montañas Rocosas. Sus 8950 kilómetros cuadrados de extensión se reparten por los estados de Wyoming, Montana e Idaho. Debe el nombre a los productos de alteración, intensamente coloreados, que el vapor de agua y el agua a elevada temperatura causan en sus rocas volcánicas. El grueso de la actividad volcánica y tectónica de la tierra se localiza cerca de los bordes de las placas rígidas, las cuales constituyen la litosfera o superficie sólida de la tierra. Pero también en los "focos térmicos", lejos de los bordes de la placa, se registra cierta actividad volcánica. Uno de esos focos térmicos es Yellowstone, situado a una distancia de 2000 kilómetros del borde occidental de la placa norteamericana. A diferencia del foco térmico representado por la isla de Hawai, que presenta una gran actividad volcánica, Yellowstone no está rodeado por agua, sino por tierra. Las peculiares características geofisicas de Yellowstone hacen de este parque un laboratorio natural único para el estudio del interior de la tierra.

Yellowstone se extiende por la divisoria continental que separa el macizo septentrional de las Montañas Rocosas del macizo central de dicha cadena, muy distinto uno de otro desde el punto de vista fisiográfico. Dentro del parque se halla la meseta de Yellowstone, una zona cubierta de bosque de 6500 kilómetros cuadrados de extensión y una altitud media de 2000 metros. Esta meseta se formó a partir de la acumulación de riolita y basalto, rocas volcánicas comunes que difieren mucho en su composición mineral respectiva. En efecto, las riolitas están constituidas por más de un 72 por ciento de dióxidos de silicio; los basaltos, por contra, poseen sólo un 50 por ciento de dichos compuestos. La meseta limita al norte, al este y al sur con montañas que se elevan hasta los 4000 metros. Hacia el oeste y el sudoeste hay una progresiva disminución de la altura gracias a una zona de transición, denominada Island Park, que enlaza finalmente con una región árida y de poco relieve, la llanura aluvial del río Snake, en el sur de Idaho. Esta zona coincide con Yellowstone en poseer un vulcanismo reciente y activo, y difiere en que la llanura está constituida principalmente por basalto, que domina, con mucho, sobre la riolita.



MAPA DEL NOROESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS donde se observa la localización del parque de Yellowstone en la región de confluencia de los estados de Wyoming, Montana e Idaho. El parque forma parte de la región de mayor actividad sísmica de las Montañas Rocosas. (El parque, *en color*).

Las directrices que determinaron la evolución tectónica y volcánica de la región de Yellowstone se establecieron a finales de la era Mesozoica, a lo largo de un período de intensa deformación geológica que afectó a la parte occidental de los Estados Unidos. Una serie de zonas de la corteza terrestre, que habían permanecido estables durante largo tiempo, sufrieron compresiones y acortamientos que dieron lugar a grandes pliegues y corrimientos. La deformación culminó hace 65 millones de años con la orogenia laramidense, responsable de la elevación de grandes bloques de corteza que originaron las Montañas Rocosas intermedias y meridionales. Los bloques corticales estaban separados por cuencas que se fueron rellenando, más tarde, con notables espesores de sedimentos.

Debido a la orogenia, en la parte septentrional de las Montañas Rocosas hubo un vulcanismo activo hasta hace

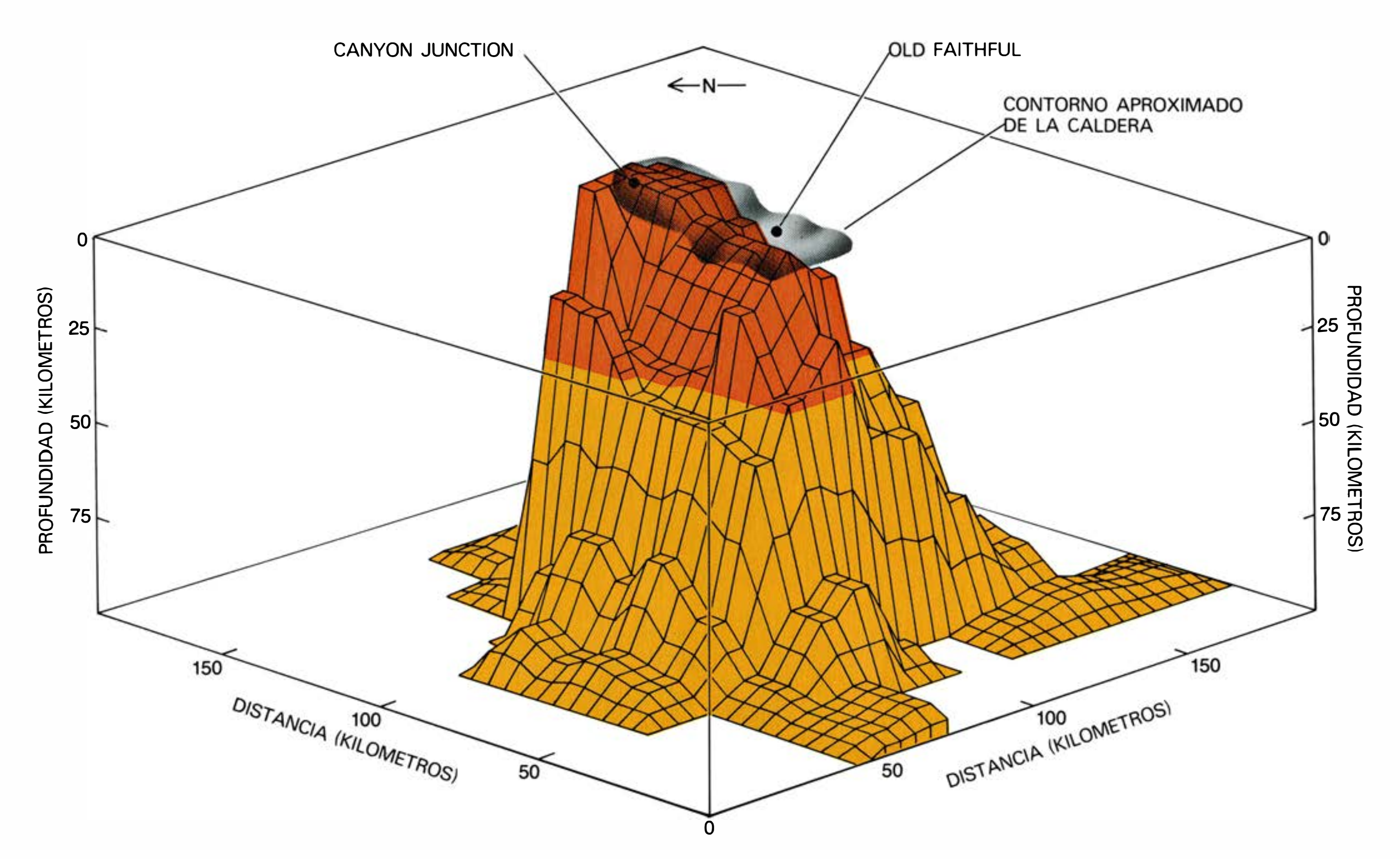
unos 40 millones de años. Las coladas volcánicas eran, sobre todo, de andesita, roca volcánica con un contenido en sílice intermedio entre el correspondiente a la riolita y al basalto. En Yellowstone y en Island Park, tras un hiato de casi 40 millones de años, empezó un nuevo período de vulcanismo.

A lo largo de los dos últimos millones de años, el magma (rocas fluidas) ha llenado, varias veces, inmensas cámaras existentes bajo la meseta. El magma actual, parcialmente solidificado y cristalizado, es la fuente de calor de las numerosas manifestaciones hidrotermales del Parque Nacional de Yellowstone: geysers, fuentes termales, "mud pots" y fumarolas (aberturas volcánicas con salida de vapor de agua). Durante los dos últimos millones de años, millares de kilómetros cúbicos de magma riolítico llegaron al exterior a través de erupciones volcánicas. La tasa media de producción de magma ha resultado equiparable a la de las regiones volcánicas más activas de la tierra, entre las que se incluyen las islas de Hawai e Islandia y las dorsales oceánicas. El vulcanismo de Yellowstone, más episódico, ofrece períodos con erupciones voluminosas que duran solamente unas pocas horas, días o meses, separados por intervalos de quietud, que llegan a prolongarse por centenares de miles de años. La actividad volcánica, predominantemente basáltica, de las regiones oceánicas muestra una continuidad mucho mayor.

Un avance importante en la comprensión de la evolución volcánica de Yellowstone se produjo gracias al descubrimiento de que la mayor parte de la riolita no fue emitida en forma de coladas de lava sino en forma de coladas especiales de ceniza volcánica y gases calientes. Los trabajos realizados por uno de nosotros (Christiansen) y H. Richard Blank, Jr., del Servicio Geológico de los Estados Unidos, han demostrado que gran parte de la riolita apareció en las erupciones de los tres ciclos catastróficos que han tenido lugar durante los dos últimos millones de años. En cada ciclo, y en un lapso de tiempo corto, se produjeron tantas erupciones de coladas de cenizas que se enfriaron conjuntamente formando una unidad y adquiriendo una serie de configuraciones características de cristalización y soldadura.

Cada ciclo empezaba con la emisión de coladas de lava intermitentes, alcanzaba su punto culminante en una eyección catastrófica de material piroclástico y terminaba con la emisión de más coladas de lava. El volumen de las coladas de cenizas calientes se produjo a una escala desconocida hasta ahora en los registros de la historia geológica. Las cenizas, que fluian en coladas de decenas de kilómetros, se soldaban y formaban riolitas duras que recubrían millares de kilómetros cuadrados. Las erupciones masivas de cada ciclo empobrecieron considerablemente las cámaras magmáticas existentes bajo la superficie, haciendo que los techos de estas últimas se colapsaran para originar grandes calderas: cuencas a modo de cráter cuyo diámetro medía decenas de kilómetros. En el curso de estas erupciones explosivas, fragmentos de material volcánico cristalino y vítreo salían despedidos hasta zonas altas de la atmósfera, siendo transportados a lo largo de miles de kilómetros. Se han encontrado restos de estos materiales en zonas muy alejadas, como Saskatchewan, Texas y California. Posteriores erupciones de lava riolítica rellenaron, en parte, las calderas.

Las edades de las rocas volcánicas originadas durante los tres ciclos de vulcanismo fueron determinadas por John D. Obradovich, del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Obradovich dató las distintas unidades midiendo la concentración del isótopo radiactivo del potasio en relación con el producto resultante de su desintegración (el argón). Esta datación, junto con la cartografía y la estrati-



MODELO DE LA DENSIDAD de la corteza y del manto superior existentes bajo la región de Yellowstone. En él se muestra una columna de 30 kilómetros formada por materiales cuya densidad máxima es 0,2 gramos por centímetro cúbico menor que la densidad de los materiales que lateralmente los rodean. Por debajo existe una columna cuya densidad máxima es 0,1 gr/cm³ menor que la correspondiente a los materiales envolventes.

grafía geológica, sugiere que el primer (y el más voluminoso) ciclo de vulcanismo empezó hace unos 2,2 millones de años con pequeñas erupciones de riolita y basalto alcanzando su paroxismo, hace dos millones de años, con la primera erupción catastrófica de coladas de ceniza. A raíz del enfriamiento de estos materiales, se formó una unidad, denominada toba de Huckleberry Ridge, que tiene un volumen de más de 2500 kilómetros cúbicos. Un volumen de material ígneo de esas proporciones, emitido en un intervalo temporal tan corto, implica la existencia de una gran cámara magmática en la parte superior de la corteza. El techo de esta cámara se colapsó cuando se produjo la emisión de magma, pero la caldera resultante, que se extendía por la zona de Island Park y por la meseta de Yellowstone, ha sido recubierta, en gran parte, por rocas volcánicas de origen más reciente.

De los tres, el segundo ciclo de vulcanismo fue el menos productivo. Comenzó con erupciones de lava riolítica en una zona situada en el interior de la primera caldera, en la región septentrional de Island Park. La erupción de coladas de lava de mayor intensidad, que formó la toba de Mesa Falls, se produjo hace 1,2 millones de años dando lugar, tras su enfriamiento, a una unidad geológica cuyo volumen superaba los 280 kilómetros cúbicos. Después de haberse producido los dos primeros ciclos de vulcanismo, el centro de la actividad volcánica desapareció por completo de Island Park, trasladándose a la meseta de Yellowstone. A lo largo del último millón de años se solidificaron las cámaras de magma riolítico situadas bajo la zona de Island Park. Durante los últimos 200.000 años se han formado fracturas de origen tectónico que afectaron a las antiguas calderas y a las masas de magma solidificado subyacentes. A consecuencia de ello se produjeron erupciones de basalto por entre las fracturas del fondo de las calderas.

El registro que poseemos del tercer ciclo volcánico, iniciado hace unos 1,2 millones de años, es el más completo de los tres. Durante 600.000 años se produjo una erupción intermitente de lava riolítica en la meseta de Yellowstone. Esta lava surgió a través de un sistema de fracturas anulares, en proceso de formación lenta, que delimitaban una zona que posteriormente se colapsaría para dar lugar a la caldera del tercer ciclo. Estos acontecimientos sugieren que se estaba formando una gran cámara magmática en la parte superior de la corteza. Periódicamente, el techo de la cámara adquiría forma de domo, se alargaba y hundía con la consiguiente aparición de fracturas anulares. Hace

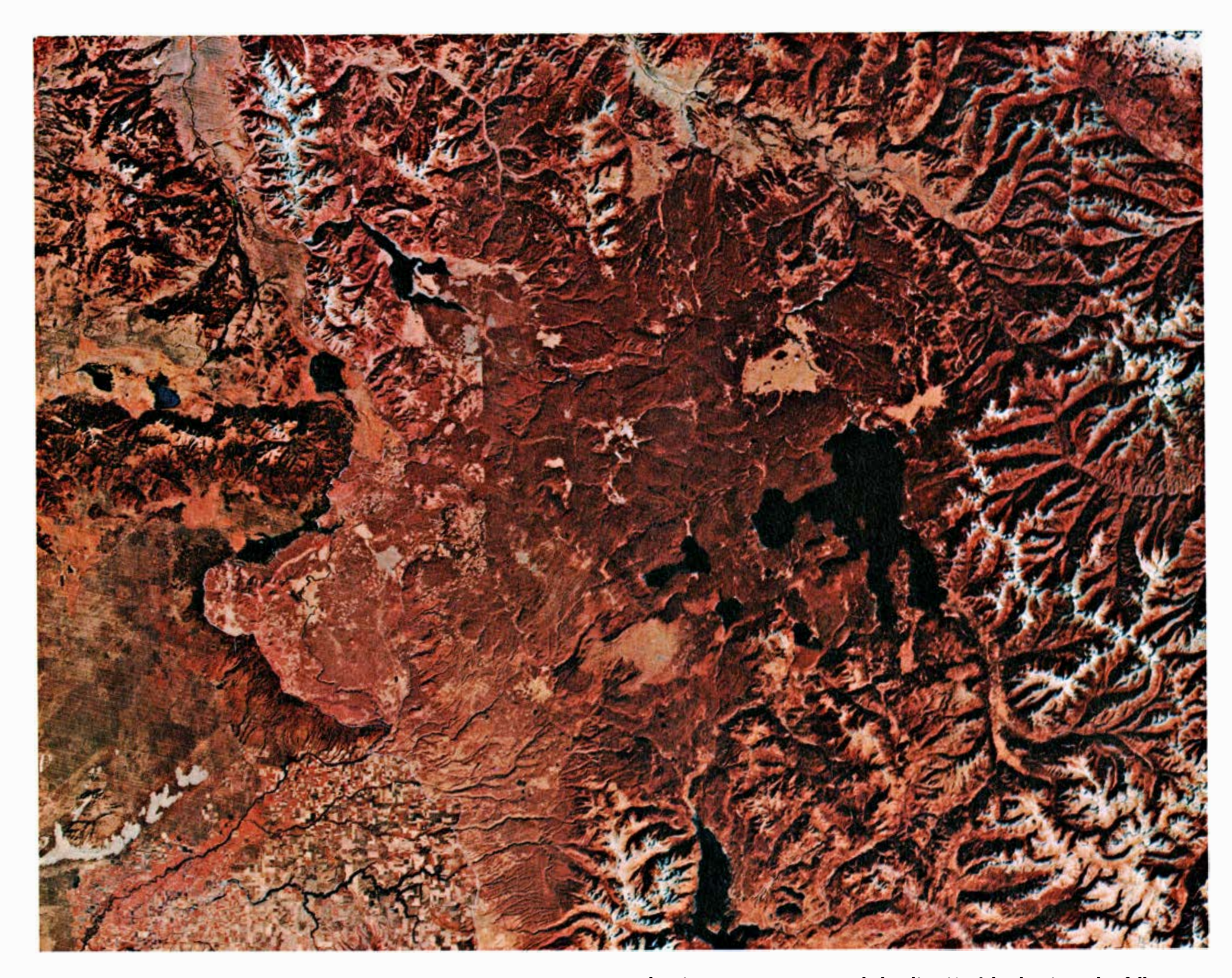


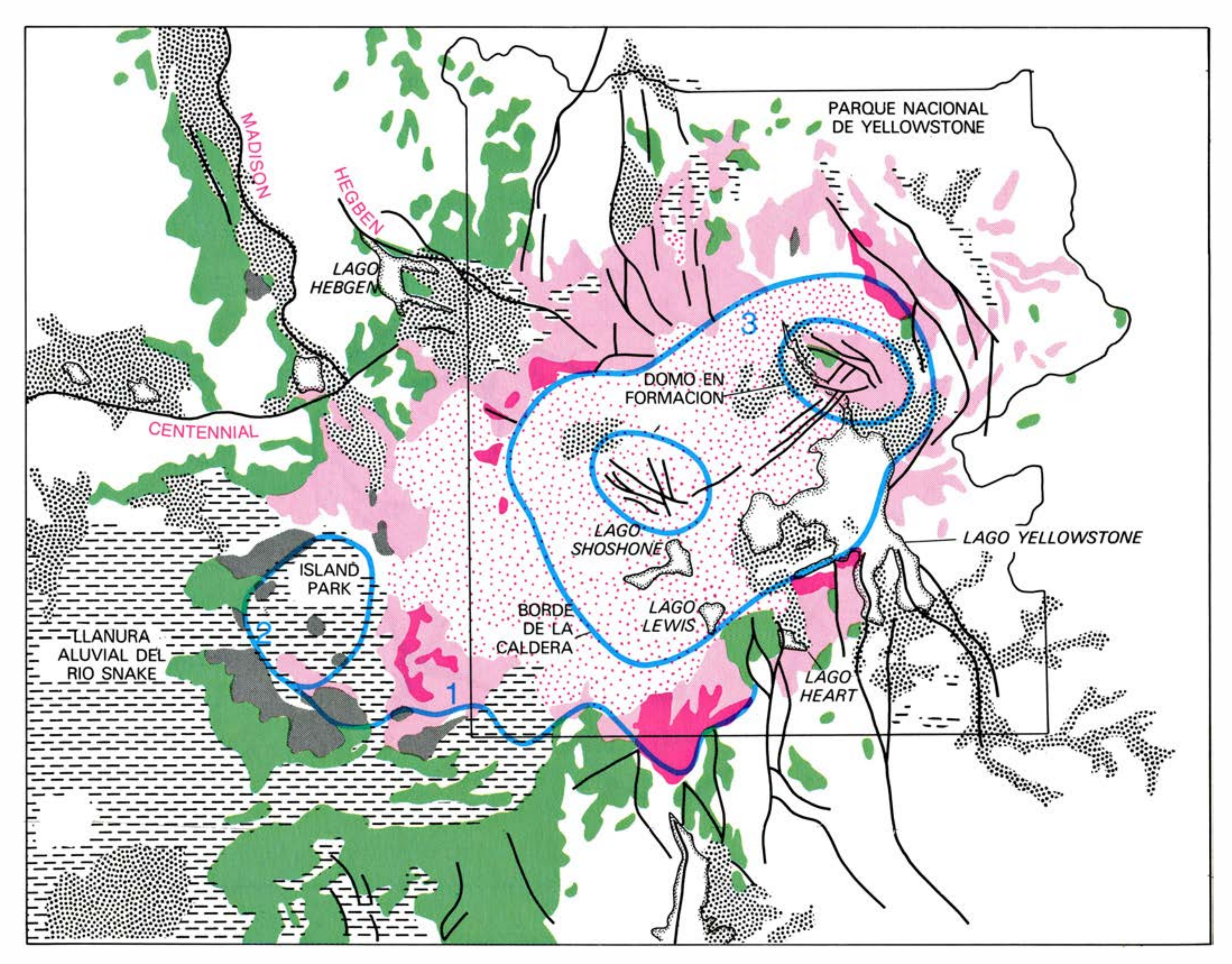
IMAGEN DE SATELITE DE YELLOWSTONE y del sector oriental de la llanura aluvial del Río Snake. Se trata de una composición en falso color hecha en el otoño de 1978. Las zonas oscuras de color marrón rojizo son bosques, las partes en marrón claro son campos de cultivo y las de color blanco montañas o manifestaciones hidrotermales. A la derecha, el mapa de la misma zona nos muestra la localización del vulcanismo, las fallas maestras y los tipos de roca volcánica. Los nombres de las zonas de fallas maestras aparecen en rojo. Yellowstone ha sufrido tres ciclos de vulcanismo a lo largo de los últimos tres millones de años. En las fases de máxima erupción se ha formado siempre una caldera, o gran depresión en forma de

600.000 años, la lava riolítica había penetrado enteramente por el sistema de fracturas anulares. Concurrían, pues, las condiciones idóneas para que se produjera una erupción paroxismal que emitiera un gran volumen de magma a través de dichas estructuras anulares.

Las causas que desencadenan semejante erupción de piroclastos siguen un tanto obscuras. El magma es una masa fundida de silicatos que contiene pequeñas cantidades de vapor de agua, otros gases disueltos y (si las temperaturas son suficientemente bajas) cristales de silicato. En un sistema en intumescencia como el de Yellowstone, las fracturas anulares se podían propagar hacia abajo, penetrando finalmente la cámara magmática principal y reduciendo, por tanto, la presión del magma de suerte que los gases disueltos se separaran de la solución. Otra posibilidad es que el agua subterránea, de circulación profunda, pudiera penetrar en el magma y saturarlo. Tanto un proceso como el otro podría iniciar una reacción en cadena que diera lugar a sobresaturación, separación y degasificación. Este último proceso (degasificación) podría empujar hacia arriba al magma en efervescencia, forzándolo a penetrar a través de las fracturas anulares, y rebajar aún más la presión.

Sea cual sea el posible mecanismo desencadenante, está claro que una vez ha empezado la degasificación, ésta se continuará produciendo probablemente a un ritmo limitado sólo por las dimensiones de las fisuras que conducen el magma al exterior. El magma cesará en su erupción en el caso único de que la presión del interior de la cámara disminuya hasta un valor de equilibrio, o cuando se sobrepasen los límites de viscosidad que permiten el flujo del mismo. En el transcurso del breve episodio de degasificación explosiva se produce la expansión, por efervescencia en la cámara, de una gran cantidad de magma que luego se enfría y fractura por la liberación súbita de la presión. El magma enfriado se expulsa hacia la superficie a altas velocidades en forma de fragmentos vítreos y cristalinos. También se expulsan trozos de roca arrancados de las paredes de las fisuras, por donde se escapa el magma al exterior,

La erupción paroxismal del tercer ciclo arrojó 1000 kilómetros cúbicos de magma, que formaron las tobas de Lava Creek. El análisis estratigráfico detallado revela que la toba no consta de una sino de dos acumulaciones estratiformes de ceniza que, por haber hecho erupción en intervalos de tiempo muy próximos, se soldaron y cristalizaron cual una sola unidad de enfriamiento. Además, la caldera que se formó a partir del hundi-



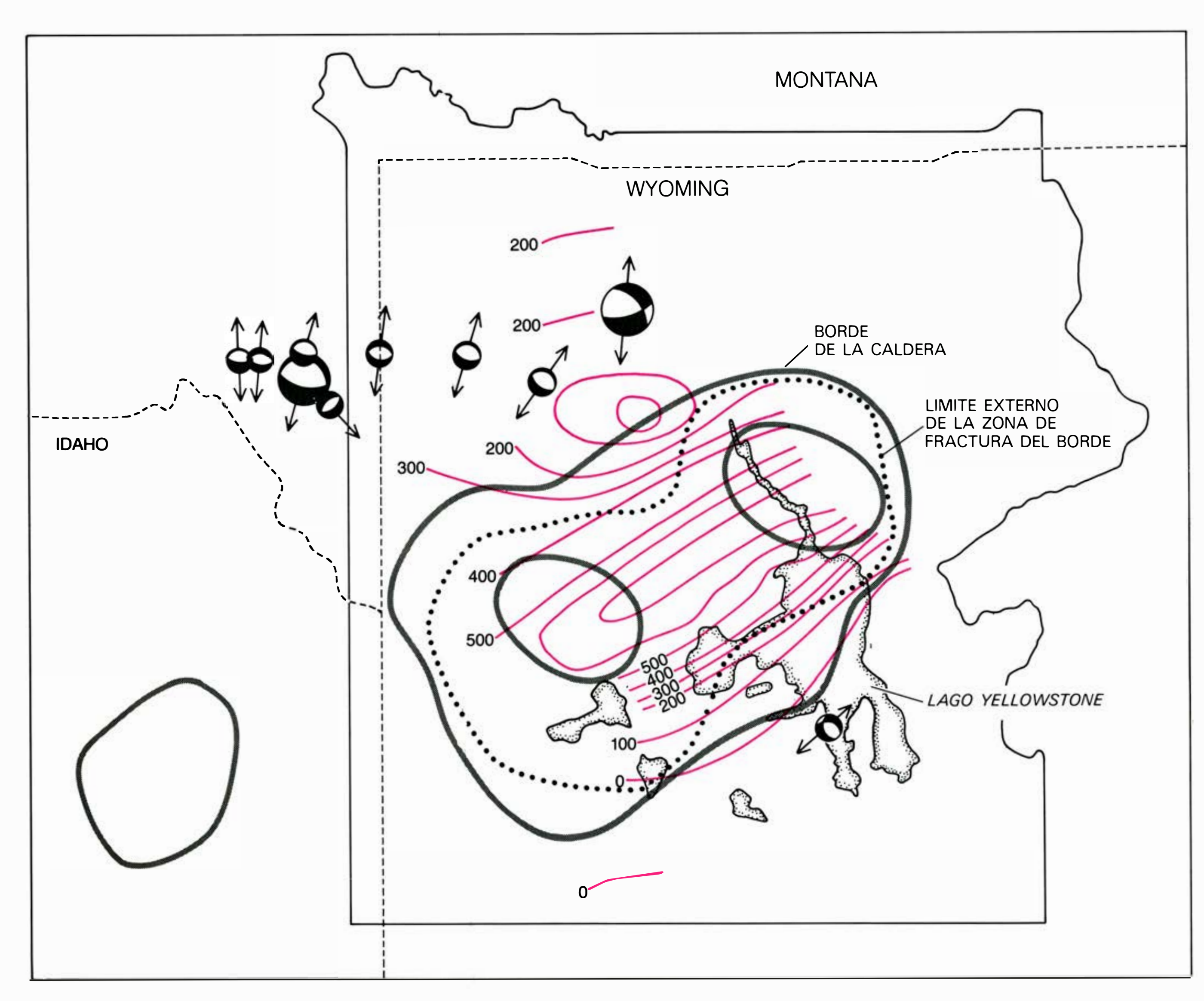
cráter, cuyo contorno se dibuja en azul. Los números azules corresponden al ciclo de vulcanismo en el que se formó la caldera. Las zonas punteadas son aluviones (sedimentos depositados por el agua de los ríos) y las líneas de trazos son basalto. Las zonas en verde, gris o rojo representan acumulaciones de riolita. Las zonas en verde indican riolita emitida durante el primer ciclo; las grises, riolita emitida en el segundo ciclo, y, las de color rojo oscuro, lava riolítica de las erupciones del tercer ciclo, anterior a la formación de la caldera. Las zonas en rojo claro son coladas de ceniza riolítica depositadas en la fase de máxima actividad volcánica del tercer ciclo. Los puntos rojos son lava riolítica emitida tras la formación de la caldera.

miento del techo de la cámara magmática de la zona de Lava Creek posee dos zonas de fracturas anulares adyacentes y que casi se solapan. Estas zonas corresponden a dos acúmulos en la parte superior del magma que suministró el material de erupción formador de la toba de Lava Creek. El drenaje rápido de la cámara principal produjo el hundimiento del techo, a lo largo de dos zonas de fracturas anulares que se solapaban, dando lugar a una caldera de 45 kilómetros de anchura por 75 kilómetros de longitud.

Si la caldera de Yellowstone hubiera continuado siendo una cuenca, que se hubiera rellenado posteriormente de sedimentos y nuevas coladas de lava, apenas conoceríamos nada de la doble estructura anular. Sin embargo, la llegada de nuevo magma a la cámara produjo el levantamiento de la parte central no fracturada de una y otra estructura anular, que originaron ambos domos. El fondo de la caldera se elevó inmediatamente después de su hundimiento. La erupción de coladas de ceniza, el hundimiento de la caldera, la llegada de magma a la cámara y el abombamiento del fondo de la caldera fueron procesos que acontecieron en un lapso de tiempo de escasos millares de años (cuya duración, demasiado corta, no puede establecerse por el método de datación del potasio-argón).

A lo largo de los últimos 600.000 años ambos segmentos de la caldera se han ido rellenando de sedimentos y de lava riolítica emitida a intermitencias. La mayor parte de la depresión formada por la caldera se halla cubierta de lava riolítica producida por las erupciones que han tenido lugar durante los últimos 150.000 años. Las erupciones se escapan por dos sistemas de fisuras que atraviesan la caldera, y que son prolongación de fracturas exteriores a ella. Con pocas excepciones, las fisuras han dado paso a magma riolítico, hasta el exterior, sólo allí donde cortan fracturas anulares de la caldera. Este hecho sugiere que el magma localizado en la parte superior de la cámara de Yellowstone ha estado cristalizando y solidificándose durante los últimos 150.000 años. A medida que la corteza solidificada va adquiriendo rigidez suficiente como para fracturarse, las fallas producen roturas que permiten al magma más profundo su ascensión hacia la superficie y su erupción.

Las características del flujo de calor por conducción proveniente del interior



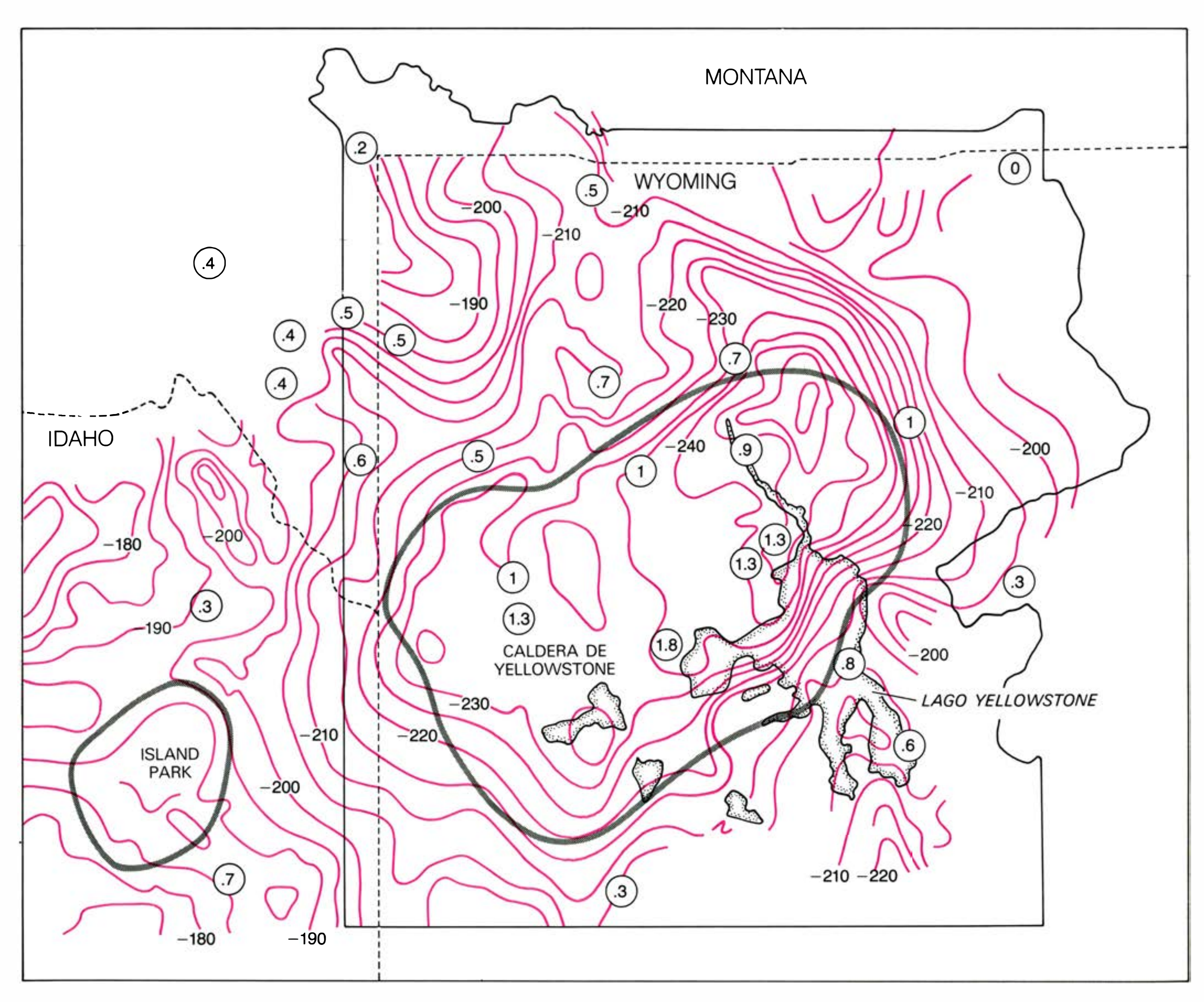
LOS DIAGRAMAS ESFERICOS son proyecciones estereográficas del movimiento del suelo que ayudan a los geólogos a determinar la orientación de las fallas que producen los terremotos. El tamaño de la esfera y su situación en el mapa nos da la intensidad del terremoto en el punto correspondiente. El coloreado negro de la esfera indica la compresión del suelo (en donde aumentó de densidad) y la parte blanca muestra donde el suelo sufrió una extensión (disminuyó de densidad). La flecha marca la dirección de la componente horizontal del movimiento del suelo. Las líneas de color nos dan el desplazamiento vertical (en mm) de la superficie topográfica del parque con respecto a un vértice geodésico situado en su parte oriental.

de la tierra nos proporcionan valiosas indicaciones para comprender los procesos térmicos que se producen en la corteza terrestre y en el manto subyacente. El flujo de calor se mide en miliwatt por metro cuadrado. El valor del flujo de calor caracteriza la etapa de la evolución tectónica en que se encuentra una región.

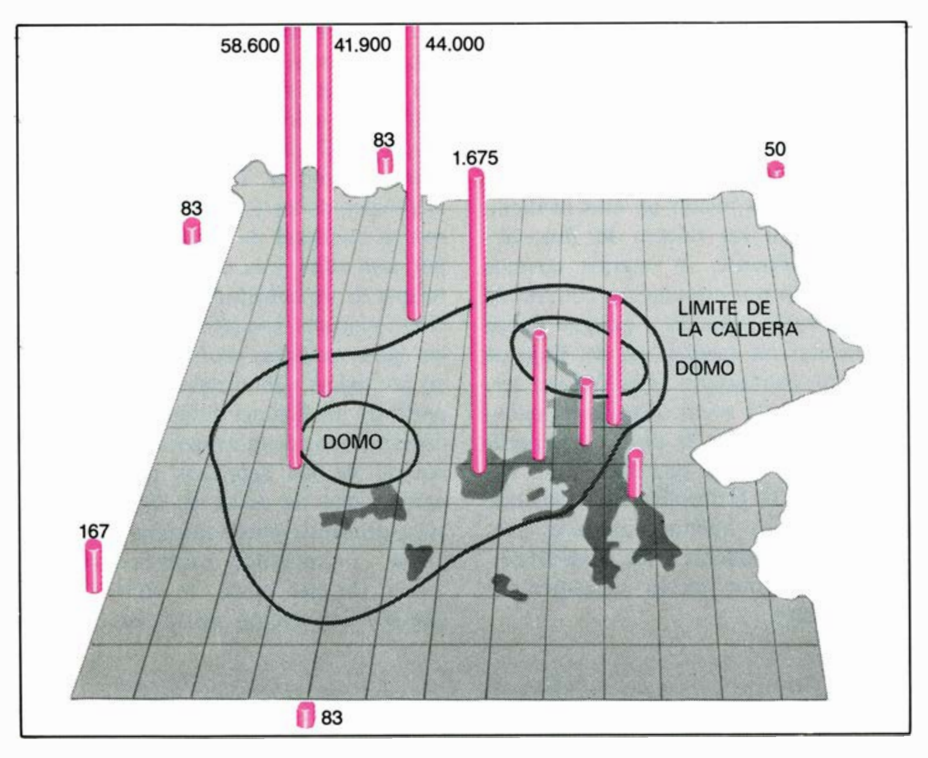
Así, por ejemplo, las zonas estables de las Montañas Rocosas, cerca de Yellowstone, tienen un flujo de calor medio de unos 60 miliwatt por metro cuadrado, que es un valor cercano al promedio global. Por otro lado, extensas zonas de la parte occidental de América del Norte, que mostraron actividad tectónica a lo largo de los últimos 17 millones de años, tienen un flujo de calor de unos 100 miliwatt por metro cuadrado. Determinadas zonas de la llanura aluvial del Río Snake posseen un flujo de calor de 150 miliwatt por metro cuadrado.

Las mediciones del flujo de calor por conducción se complican debido a la circulación del agua por la corteza. Así, la circulación de aguas subterráneas en los acuíferos puede incidir en esas mediciones al rebajar los valores del flujo térmico. Igualmente, la energía térmica transportada por circulación convectiva en las fuentes termales y geysers puede distorsionar las mediciones del flujo de calor por conducción. Las fuentes termales y geysers se encuentran en cuencas que constituyen la descarga superficial de agua caliente que circula por sistemas de fallas profundas, entre las que se incluyen las fracturas anulares profundas de las calderas y las fallas de origen tectónico que cortan radialmente a las anteriores.

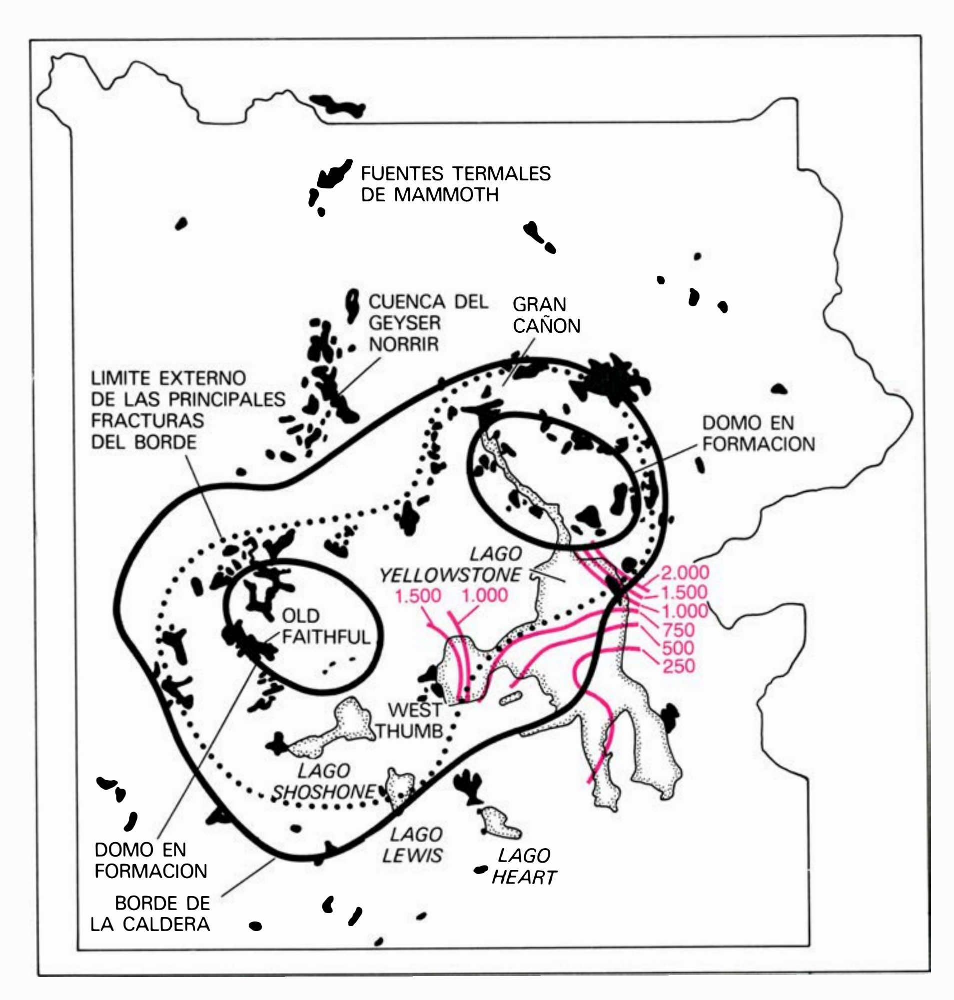
Esta actividad hidrotermal transporta el calor existente en las zonas profundas por convección, y no por conducción. El flujo de calor convectivo ha sido estimado por Donald E. White, R. D. Fournier y Alfred H. Tuesdell, del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Midieron la cantidad de agua que circulaba por una zona y la concentración en la misma de un constituyente estable como el ion cloruro. Los cloruros abundan en las aguas termales profundas y escasean en las aguas subterráneas normales. A partir de mediciones cuantitativas y modelos teóricos de la temperatura del agua líquida de los acuíferos subterráneos, una unidad de masa de cloruro en el agua profunda puede asimilarse a la entalpía, o contenido calorífico, del líquido. De este modo, el flujo de calor que por convección sale de una cuenca



ISOLINEAS de la aceleración de la gravedad medidas en miligals (un miligal equivale a 10^{-3} centímetros por segundo al cuadrado). Demuestran que el material subyacente a la caldera es mucho menos denso que el circundante. Cada número rodeado por un círculo da el retardo del tiempo de propagación de una onda de compresión sísmica (onda *P*) registrada en un sismógrafo situado en el interior del círculo. El retardo de una señal corresponde a una disminución de velocidad en el material existente bajo el sismógrafo. Retardos considerables, de hasta 1,8 segundos (para terremotos producidos a distancias entre 2000 y 10.500 kilómetros), registrados en sismógrafos situados en la caldera, sugieren la presencia de un material lento.



FLUJO DE CALOR en la meseta de Yellowstone. Se transmite por conducción y convección; su valor se da en miliwatt por metro cuadrado. El flujo de calor procedente del fondo del lago Yellowstone, medido por Paul Morgan y D. Blackwell, de la Universidad Metodista del Sur, se debe únicamente a conducción, ya que la presencia de sedimentos impermeables inhibe la convección hidrotermal.



MAPA DE LOS ELEMENTOS HIDROTERMALES de Yellowstone (geysers, fumarolas y fuentes termales). En él se observan las isolíneas del flujo de calor (*color*) para el lago Yelowstone en miliwatt por metro cuadrado. La caldera que se formó en el tercer ciclo tiene dos zonas de fracturas anulares.

hidrotermal puede estimarse a partir de la masa total de cloruro descargada en el drenaje superficial de la cuenca. El calor liberado por todos los manantiales ricos en cloruro de Yellowstone es de unos $5{,}3 \times 10^9$ watt. De ahí puede concluirse que el flujo de calor medio que por convección sale de la caldera es, como mínimo, de 1800 miliwatt por metro cuadrado, valor que es más de 20 veces superior al promedio del flujo de calor continental que fluye por conducción.

El sector sudoriental de la caldera está inundado por el lago Yellowstone bajo el cual se encuentra un gran reservorio de agua termal. Resultó fácil calcular el flujo de calor que por conducción sale por el fondo del lago gracias a la existencia de una capa de sedimentos de 300 metros de espesor, relativamente impermeable a la circulación del agua, y que, por tanto, inhibe la propagación del calor por convección. El valor mínimo del flujo de calor (120 miliwatt por metro cuadrado, es decir, el doble del promedio regional) se localiza en el extremo meridional del lago. Dentro de la caldera, a cinco kilómetros del borde, el flujo de calor se eleva hasta 700 miliwatt por metro cuadrado. Ese extraordinario aumento obliga a admitir, forzosamente, la extensión lateral de la fuente de calor por zonas poco profundas de la corteza. Además, valores del flujo de calor de unos 1500 miliwatt por metro cuadrado, en West Thumb y en Mary Bay, reflejan, probablemente, el flujo de calor que sale de un sistema hidrotermal situado a poca profundidad bajo el lago. La medición de temperaturas de 104 grados Celsius a sólo cuatro metros por debajo del fondo del lago, junto con los resultados de los perfiles sísmicos (para cuya obtención se envían hacia el fondo ondas sonoras, registrándose luego los ecos resultantes), revela que quizás hayan sedimentos embebidos en vapor de agua en la parte superior de un sistema hidrotermal superficial.

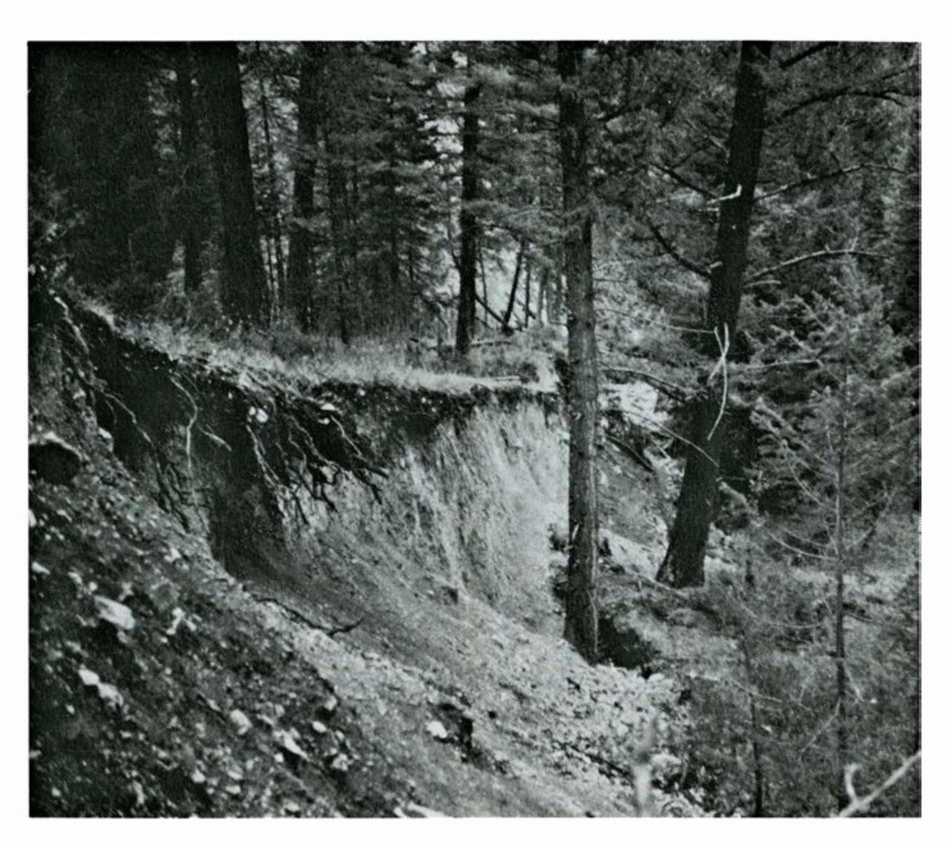
El flujo de calor total (el de conducción más el convectivo) que sale de la caldera de Yellowstone se debe a un elevado flujo de calor regional y a la energía térmica procedente de focos localizados en zonas superficiales de la corteza. El calor transportado hasta la superficie por el sistema convectivo hidrotermal, durante los últimos 20.000 años por lo menos (y quizá durante mucho más tiempo), no es sólo resultado del enfriamiento de las rocas volcánicas de la meseta. Hace muy poco tiempo había, sin ningún género de duda, magma líquido en la cámara de Yellowstone, y hasta es posible que todavía lo encontremos hoy. El elevado flujo de calor que atra-

viesa la caldera se debe al enfriamiento y cristalización de una masa de magma riolítico, localizado a una profundidad de unos pocos kilómetros, y a la circulación de aguas subterráneas por las fallas de la caldera hasta zonas suficientemente profundas como para que puedan calentarse y dirigir la convección hidrotermal.

Los terremotos que se registran en Yellowstone tienen su explicación en las fallas y en la fracturación frágil que se producen entre los 10 y 20 kilómetros superiores de la corteza. Las investigaciones realizadas sobre la localización, longitud, desplazamiento y edad de las fallas de la zona de Yellowstone y de la región circundante aportan una documentada información sobre su historia tectónica. La actividad tectónica que empezó hace unos 17 millones de años en gran parte del sector occidental de Estados Unidos produjo la extensión de la corteza y un levantamiento importante. En efecto, desde esa época, el Great Basin de Utah y Nevada se ha elevado 1,5 kilómetros aproximadamente.

El levantamiento y la extensión de tierras resultante han permitido el desarrollo de una topografía constituida por valles y cadenas montañosas paralelos, limitados por grandes fallas, como la que forma el Wasatch Front de Utah y el Sierran Front de California y Nevada. Yellowstone ha sufrido una serie de cambios topográficos similares ya que se encuentra en la parte nororiental de las tierras levantadas. El espectacular escarpe existente en el sector este de la Sierra de Teton refleja una zona de falla que se extiende hacia el norte bajo las coladas riolíticas de la caldera de Yellowstone. A lo largo de un período de 10 millones de años, por lo menos, los materiales existentes en uno de los labios de esta falla han experimentado un desplazamiento vertical superior a los cuatro kilómetros con respecto a los situados en el otro labio. Al norte y al oeste de la caldera, las direcciones de las fallas pasan a ser noroeste. Y más hacia el oeste, las fallas del lago Hebgen y de Centennial presentan esta última dirección formando un ángulo de 90 grados con la falla de Teton. Las estructuras internas de las cadenas de Centennial y de Teton están inclinadas hacia el eje de la llanura aluvial del río Snake y recubiertas por rocas volcánicas recientes en las cercanías de las zonas marginales de la llanura. Ello sugiere un hundimiento producido por una flexión cortical.

En otras palabras, Yellowstone constituye la intersección de tres direcciones tectónicas: la de rumbo nordeste (que corresponde a la flexión de la llanura del Río Snake), las fallas de orientación norte (localizadas al sur de la meseta de Yellowstone) y las fallas este-sudeste, que se encuentran al oeste y al norte. La intersección de estas direcciones sugiere que Yellowstone se asienta en el foco de fracturación y esfuerzo que ayudó a concentrar en esa zona gran parte del vulcanismo y de la deformación cortical. La actividad sísmica generalizada indica que muchas de las fracturas de la región siguen activas.



ESCARPE DE LA FALLA DEL RED CANYON. Se encuentra a tres kilómetros al norte del lago Hebgen, en Montana, y a 10 kilómetros al oeste del parque. Sufrió un desplazamiento vertical de varios metros causado por el terremoto del lago Hebgen, en 1959. El terremoto tuvo una magnitud de 7,1.

Ignoramos las posiciones exactas de los terremotos ocurridos en el Parque Nacional de Yellowstone antes de la década 1960-70 por no existir hasta entonces sismógrafos en esa zona. Ello no impide que podamos reconstruir la distribución general de los epicentros sísmicos a partir de los testimonios personales aportados sobre la intensidad de los temblores. Tales informaciones indican que a lo largo del siglo pasado hubo muchos más terremotos en la zona de Yellowstone y en su vecindad que en las regiones circundantes de Montana, Wyoming e Idaho. El terremoto de mayor intensidad registrado en las Montañas Rocosas ocurrió en el lago Hebgen, en 1959, y su epicentro se localizó a unos pocos kilómetros al oeste de Yellowstone. Con una magnitud de 7,1 de la escala de Richter, el terremoto se sintió en un área de 1,5 millones de kilómetros cuadrados. La superficie topográfica sufrió un desplazamiento de hasta seis metros a lo largo de una de las dos grandes fallas asociadas al terremoto. Las ondas de choque desencadenaron una avalancha en masa de rocas que represaron el río Madison, basculando también el terreno a lo largo de la orilla septentrional del lago Hebgen y produciendo un hundimiento de hasta seis metros. Terremotos de esta intensidad se han sucedido en esta zona una vez cada varios centenares o miles de años, como mínimo.

Algunos de los terremotos registrados en la parte occidental del parque durante los últimos 20 años son temblores secundarios de la sacudida principal ocurrida en 1959 en el lago Hebgen. Sin embargo, los estudios sísmicos revelan una alta incidencia de terremotos en una región que se extiende 50 kilómetros hacia el este de la zona de falla del lago Hebgen, hasta el sector noroccidental de la caldera de Yellowstone. Los hipocentros de estos terremotos se hallan a profundidades de hasta 16 kilómetros. Esta zona de actividad símica se extiende hacia el este hasta las cercanías de la Cuenca del Norris Geyser, en donde la sacudida más intensa había alcanzado la magnitud de 6.

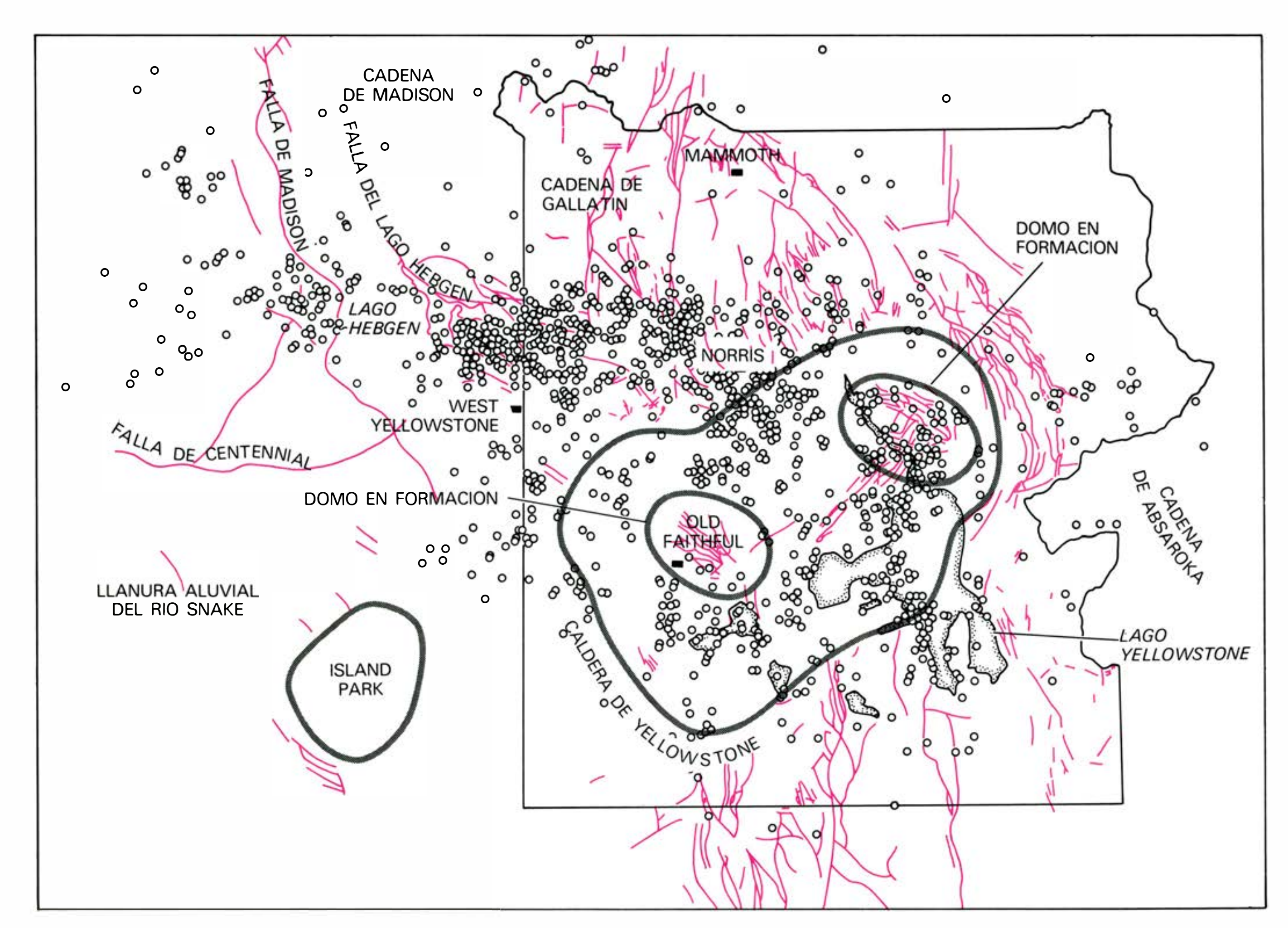
En la propia caldera y en su vecindad la actividad sísmica es episódica y con-

centrada: se produce un gran número de terremotos en períodos cortos de tiempo y en una zona limitada, sin que se registre ninguna sacudida principal. Los modelos de laboratorio sugieren que estos "enjambres" de terremotos, frecuentes en regiones de vulcanismo activo, están en relación con esfuerzos concentrados. En las zonas hidrotermales de Yellowstone los esfuerzos de este tipo podrían ser debidos a la existencia de altas presiones de fluido a temperaturas elevadas. La cuenca de Norris Geyser posee probablemente el reservorio térmico de menor profundidad y de temperatura más alta de la zona de Yellowstone (más de 275 grados C). La estrecha asociación entre la actividad sísmica y la actividad hidrotermal intensa existentes en la cuenca sugiere que las fracturas producidas por los terremotos pueden servir de conducciones para la circulación del agua caliente por encima de un foco térmico superficial. Al sudeste de la cuenca del Norris Geyser la actividad sísmica se hace más dispersa, con una profundidad máxima de los hipocentros que rara vez sobrepasa los ocho kilómetros.

El levantamiento y subsidencia de la corteza en la región de Yellowstone es producto de la actividad tectónica y sísmica. Los valores absolutos del levantamiento y subsidencia no pueden determinarse debido a la ausencia de puntos de referencia fijos que podrían utilizarse para medir los cambios de altitud. Lo que se conoce es el cambio de altitud de zonas del parque en relación con determinados vértices geodésicos fijados en 1923 y vueltos a medir después de 1970. John R. Pelton, de la Universidad de Utah, y uno de nosotros (Smith) encontramos que las curvas de nivel de los cambios de altitud dibujaban una zona alargada de 3500 kilómetros cuadrados coincidente con la caldera de Yellowstone. Con respecto a un vértice geodésico situado al este de la caldera, la zona se ha elevado 700 milímetros. El levantamiento máximo medido está entre los dos domos nacientes en donde la velocidad máxima de elevación ha superado los 14 milímetros por año. Velocidad de levantamiento que, por su magnitud, puede parangonarse con las velocidades registradas en volcanes activos de las islas de Hawai e Islandia.

El levantamiento podría obedecer a un aumento de la presión en un magma confinado, debiéndose este aumento, a su vez, a una separación de gases o una llegada de magma procedente de la parte inferior de la cámara. La otra posibilidad es que el levantamiento fuera provocado por esfuerzos tectónicos desarrollados en la corteza, sin relación específica con el movimiento del magma.

Las campañas geodésicas realizadas en la región que rodea Yellowstone han puesto de manifiesto que el parque forma parte de una región mayor que se está levantando unos seis milímetros por año, y que la llanura aluvial del río Snake tiene una subsidencia relativa comprendida entre dos y seis milímetros por año. En 1977, investigadores de la Universidad de Utah se dispusieron a controlar el levantamiento y subsidencia de la zona de Yellowstone, midiendo la aceleración de la gravedad en varios puntos. Si no varía la densidad o la masa de la corteza, los cambios observados en la aceleración de la gravedad en superficie pueden atribuirse a cambios de altura. Las mediciones de la aceleración de la gravedad pueden obtener una



MAPA DE LOS EPICENTROS (*círculos negros*) **de más de 1500 terremotos de magnitud comprendida entre 1 y 6 de la escala de Richter. Se ha realizado a partir de mediciones hechas por el Servicio Geológico y la Universidad de Utah. La profundidad focal máxima fue de 16 kilómetros.**

precisión de unos 3 x 10^{-3} miligal (un miligal vale 10^{-3} centímetros por segundo al cuadrado), lo que corresponde a un cambio de altitud de unos 10 milímetros. Dentro de cinco o diez años, los investigadores volverán a medir la aceleración de la gravedad en los mismos puntos y así calcular los cambios de altitud registrados.

En la investigación de la estructura geológica profunda de Yellowstone se han empleado técnicas geofísicas adecuadas que miden las variaciones de densidad, velocidad de propagación de las ondas sísmicas, conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética (capacidad de los materiales de adquirir magnetismo). Este abanico de mediciones, junto con el registro del vulcanismo, nos proporciona una visión de conjunto de las propiedades de la corteza que influyen en fenómenos observados en superficie. H. M. Iyer, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, ha medido el tiempo que tarda la onda de compresión (una onda *P*) de un terremoto lejano en propagarse desde el epicentro hasta los sismógrafos instalados en Yellowstone. Si la tierra fuera homogénea, los tiempos de propagación serían idénticos para distancias equivalentes. Cualquier retardo o adelanto en el tiempo de propagación indica un cambio en la velocidad bajo la superficie. Los sismógrafos situados en las cercanías de la caldera de Yellowstone han registrado retardos de los tiempos de propagación de hasta 1,8 segundos para las ondas *P* de terremotos distantes entre 2000 y 10.500 kilómetros. Retardos no superiores a los 0,5 segundos se registraron en la zona que rodea la caldera. El modelo construido en base a los retardos de la onda *P* bajo la zona de Yellowstone señala un 15 por ciento de reducción de velocidad dentro de la corteza y un 5 por ciento de reducción de la misma en una región que puede extenderse hasta una profundidad de 250 kilómetros en el manto superior.

Las mediciones realizadas en 900 estaciones de la caldera y en sus inmediaciones indican que la aceleración de la gravedad es de 60 miligal, menor de lo previsto si las rocas existentes bajo la caldera fueran homogéneas. Los modelos cuantitativos han demostrado que el defecto de masa responsable de la anomalía de 60 miligal podría deberse no sólo a la existencia de sedimentos de baja densidad en la caldera, sino, también, a la presencia de materiales de densidad baja en el basamento subvolcánico. Un material de este tipo podría ser magma, o bien, una masa de rocas ígneas solidificadas de baja densidad.

¿Cuál de estas posibilidades goza de mayor probabilidad? Un modelo matemático que incorpora tanto los datos de la gravedad como los del retardo de la onda *P*, y que ha sido utilizado por Jeffrey A. Evoy, de la Universidad de Utah, indica que bajo Yellowstone, y a una profundidad mínima de 250 kilómetros, existe una masa de material de densidad y velocidad de propagación sísmica bajas. Esta masa se asienta sobre un material más denso. Una estructura de este tipo es compatible con las interpretaciones geológicas que sugieren la existencia de una cámara magmática superficial constituida, al menos en parte, por magma con un contenido elevado en sílice y la presencia de bolsas menores de magma más dispersas y con menor concentración de sílice, en la corteza inferior y en el manto superior.

A partir de las propiedades magnéticas de las rocas podemos deducir las temperaturas reinantes bajo la superficie. Por debajo de cierta profundidad, denominada profundidad de Curie, las rocas han alcanzado un umbral de temperatura (la temperatura de Curie) a partir del cual dejan de presentar propiedades magnéticas. Para la magnetita pura, la temperatura de Curie es de 580 grados C; para otros materiales corticales corrientes es de unos 560 grados. Se cree que, en la zona de Yellowstone, la profundidad de Curie se encuentra a 10 kilómetros bajo la superficie, pero, en determinados puntos bajo la caldera, puede situarse incluso a seis kilómetros de profundidad. La profundidad de Curie para algunas otras zonas de la parte continental de los Estados Unidos se halla entre los 15 y los 30 kilómetros. Esto significa, naturalmente, que las rocas existentes bajo la zona de Yellowstone alcanzan una temperatura de 560 grados C a una profundidad menor que las rocas presentes bajo esas otras regiones. Las mediciones de la conductividad eléctrica de los materiales existentes bajo Yellowstone indican que, a esa profundidad, las rocas son buenas conductoras. A temperaturas elevadas los materiales suelen ser buenos conductores y, por tanto, las investigaciones magnéticas y las eléctricas concuerdan.

Todos los datos geofísicos señalan la presencia de una estructura anómala en la corteza y en el manto superior, bajo Yellowstone. Bajas velocidades de las ondas sísmicas, densidades asimismo bajas, conductividad eléctrica elevada y una profundidad de Curie superficial, todo ello favorece la existencia de una masa cortical a temperaturas altas. Según parece, entre cinco y diez kilómetros por debajo la superficie, los materiales corticales tienen una temperatura tal y son tan blandos que no pueden fracturarse pero sí deformarse por flujo y deformación lenta (creep). Aunque se desconoce con certeza si parte de este material se encuentra actualmente en forma líquida, existen muchos indicios que permiten sustentar esta conclusión.

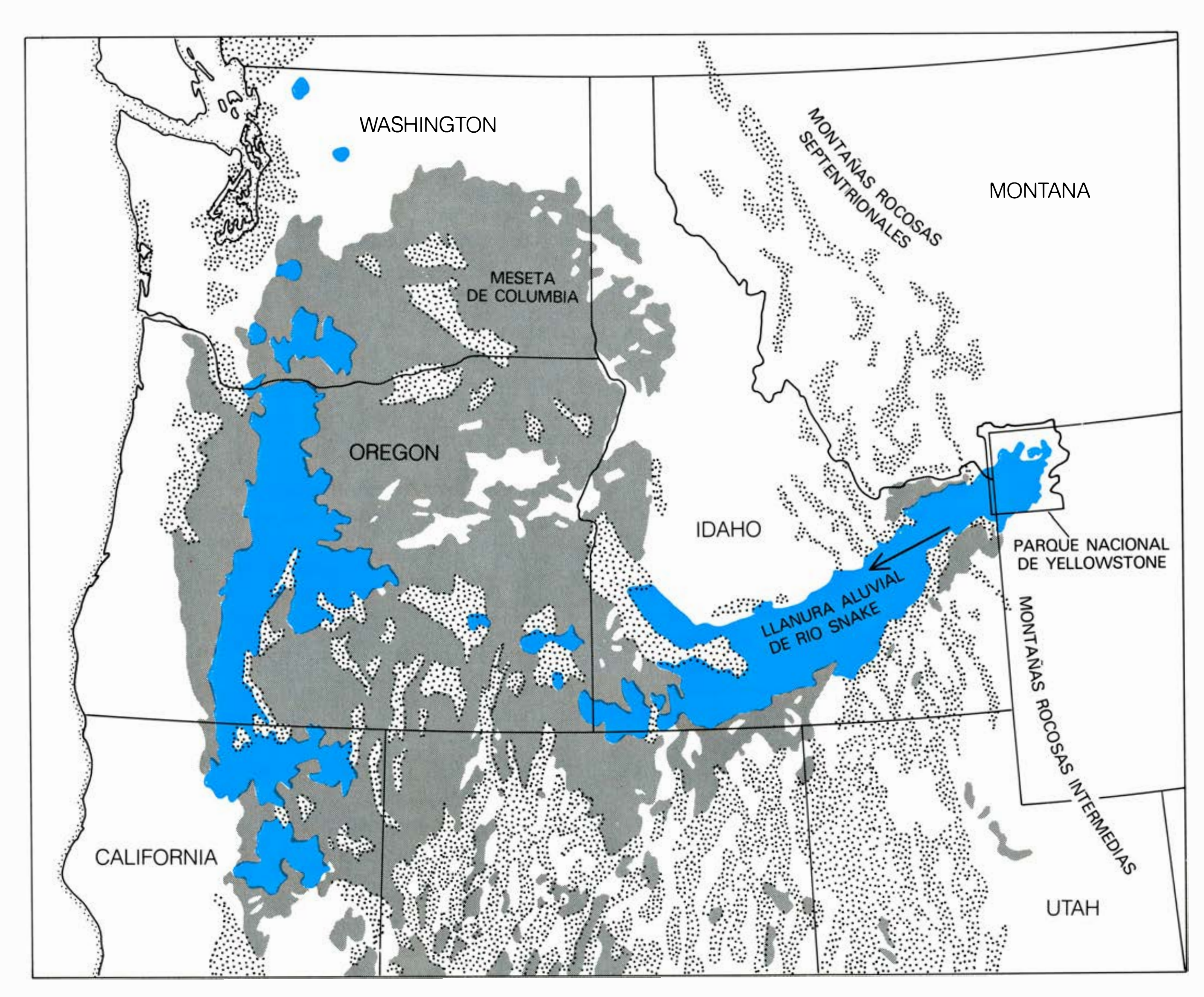
Ha llegado el momento de relacionar el marco geofísico de Yellowstone con la historia tectónica y volcánica de zonas circundantes, especialmente con la parte oriental de la llanura aluvial del Río Snake. Dijimos antes que la formación de montañas de edad laramidense se produjo bajo unas condiciones de acortamiento cortical debidas a la convergencia de dos placas litosféricas. Estas dos placas fueron la que forma el fondo del Pacífico y la que soporta el continente norteamericano. Cuando se produjo la convergencia de estas placas existía un vulcanismo andesítico generalizado en el continente. A lo largo de los últimos 30 millones de años, la tectónica a gran escala de la parte occidental de Estados Unidos ha cambiado substancialmente en virtud de una transición gradual que va desde la convergencia comparativamente simple de dos placas hasta la compleja interacción de tres de ellas: la placa norteamericana, la placa del Pacífico y la placa de Juan de Fuca. El desplazamiento a lo largo de la falla de San Andrés indica que el movimiento relativo entre la placa norteamericana y la del Pacífico es predominantemente horizontal. Una gran parte del oeste de los Estados Unidos está sometida actualmente a una extensión tectónica y ha experimentado un vulcanismo riolítico y basáltico del mismo tipo del que se ha producido en Yellowstone.

Durante este período de extensión tectónica regional, la parte oriental de la llanura aluvial del Río Snake ha evolucionado de un modo particular. Hace unos 15 millones de años, la parte este de la llanura del Río Snake y la meseta de Yellowstone no existían. A partir de esa fecha se ha venido produciendo la erupción de basalto y riolita, de forma secuencial y sistemática, que se ha ido propagando hacia el nordeste, desde cerca de los límites de los estados de Idaho, Nevada y Oregón y a lo largo de una línea que constituye hoy el eje de la parte oriental de la llanura aluvial del Río Snake. Si un observador pudiera retroceder hacia el pasado hasta cualquier momento de este período, vería otro "Yellowstone", es decir, una zona topográficamente elevada, con un vulcanismo riolítico voluminoso y una activi-

dad sísmica y volcánica generalizada. Sin embargo, en una visita posterior, encontraría "Yellowstone" más hacia el nordeste. A medida que la zona de abundante vulcanismo riolítico se propaga hacia el nordeste, a una velocidad comprendida entre dos y cuatro centímetros por año, el vulcanismo basáltico vuelve a iniciarse de forma continuada y periódica. Las regiones que tuvieron un vulcanismo riolítico activo y que han sufrido subsidencia han sido invadidas por los basaltos que formaron la parte oriental de la llanura aluvial del Río Snake.

El desarrollo de Yellowstone y de la llanura del Río Snake se ha caracterizado por una estrecha asociación entre el magma basáltico y el riolítico. Se han propuesto muchas explicaciones sobre el origen de los dos tipos de magma. La hipótesis más prometedora implica la fusión parcial de dos fuentes distintas de materiales que originan dos líquidos distintos, uno riolítico y el otro basáltico. (Esta explicación puede parecer trivial, pero no lo es. Se puede suponer que los dos tipos de magma habrían podido formarse a partir de un sólo material integrado por dos constituyentes no miscibles, y no a partir de dos materiales distintos.) El magma basáltico es muy similar al magma del mismo tipo que se forma bajo las islas oceánicas; en ambos casos, los magmas basálticos son fusiones parciales del manto superior de la tierra. El origen del magma riolítico se encuentra probablemente en la fusión parcial de rocas metamórficas existentes en la corteza inferior de la tierra.

La generación de magma basáltico, por fusión parcial del manto superior, es el proceso fundamental responsable del funcionamiento del sistema magmático de Yellowstone. El levantamiento ininterrumpido y la extensión tectónica que afectan a amplias zonas de la región de Yellowstone requiere el desplazamiento del manto hacia arriba. Puesto que la corteza sufre una extensión y el manto subyacente se mueve hacia arriba, la reducción de presión puede inducir la fusión inicial de los materiales con puntos de fusión bajos. El basalto se forma a partir de esta fusión parcial, y así ocurre igualmente en el fondo del océano, donde el manto se encuentra a sólo unos pocos kilómetros por debajo de la superficie sólida. El flujo de magma basáltico desde el manto hasta la corteza transporta calor hacia arriba. Los materiales existentes en la corteza inferior se encuentran sometidos a menos presión y tienen una concentración más alta en sílice que el magma subyacente. Por esto,



MAPA de la región de Yellowstone que relaciona los rasgos volcánicos y tectónicos recientes del parque con la tectónica y el vulcanismo del resto noroccidental de Estados Unidos. Los valles rellenos de aluviones recientes (*puntos*) nos ponen de manifiesto cadenas de montañas y cuencas limitadas por fallas. Las rocas volcánicas más recientes (de edad inferior a dos millones de años) aparecen en color y las rocas volcánicas terciarias más antiguas, en gris. El vector con una magnitud de 4,5 cm por año señala el movimiento de la placa norteamericana con respecto a un punto del manto.

cuando estos materiales funden, suministran magma con una concentración en sílice más elevada. Un magma de este tipo tiene una temperatura inferior, una densidad más baja y una viscosidad mayor que el magma basáltico y, por tanto, su flotabilidad hace que ascienda y se acumule como una gran masa en la parte superior de la corteza.

Parece que las cámaras con magma riolítico, como las que se encontraban bajo Yellowstone e Island Park durante los últimos dos millones de años, deben haber evolucionado en cada zona sucesiva de vulcanismo riolítico siguiendo el eje de propagación de la parte oriental de la llanura aluvial del Río Snake. Este tipo de propagación volcánica también se dio en las islas Hawai. El vulcanismo de Yellowstone y el de estas islas son notablemente parecidos entre sí, con la diferencia de que el sistema de Yellowstone ha evolucionado bajo una corteza continental, no bajo una océanica.

En Yellowstone y en Hawai hay, al parecer, una zona de fusión concentrada que está fija y localizada en el interior de la tierra bajo una placa litosférica en movimiento. El desplazamiento de una placa por cada uno de estos focos térmicos ha dejado un cortejo de volcanes extinguidos que son como una especie de mojones indicadores del paso de la placa. Todas las islas del archipiélago de Hawai nacieron de una fuente magmática única sobre la que se desplazaba la placa del Pacífico a medida que iba avanzando siguiendo una dirección aproximadamente nordeste. Se ha reconstruido con detalle el movimiento relativo de las placas tectónicas; ahora bien, el movimiento de una placa con respecto a otra sólo puede transformarse fácilmente en movimiento con respecto al interior de la tierra, en el caso de que se utilicen como referencia los focos térmicos anclados en el manto. Se ha estimado que el movimiento de la placa norteamericana con respecto al foco térmico de las islas Hawai es de 4,5 centímetros por año hacia el sudoeste. El vulcanismo riolítico a lo largo del eje de la llanura del Río Snake y de Yellowstone se ha propagado casi a la misma velocidad, aunque en dirección opuesta.

¿Qué mecanismo genera los focos térmicos? Aunque se han propuesto varios, resulta difícil escoger alguno en particular pues es muy poco lo que sabemos sobre la circulación del material en el manto. Según una hipótesis los focos térmicos son manifestaciones superficiales de los denominados "penachos", corrientes ascendentes en columna formadas por materiales calientes. Otra hipótesis considera que los focos térmicos son el resultado de una sobreabundancia, en el manto, de material radiactivo generador de calor. Para una tercera teoría, el calor de fricción generado en la base de la litosfera, a medida que ésta se va desplazando sobre la astenosfera subyacente, podría originar un foco térmico si se dieran las condiciones adecuadas para retener el calor producido. Y aún existe otra interpretación que sitúa los focos térmicos en los extremos de fracturas de la litosfera que se propagan linealmente gracias a la existencia de fuerzas de extensión. El foco térmico anclado bajo la región de Yellowstone es más accesible a la investigación que la mayoría de las otras estructuras continentales de este tipo; de ahí que la continuidad de los estudios sobre el parque ayudará a identificar el mecanismo generador.

Los resultados de las investigaciones realizadas sobre la historia tectónica y volcánica de la región de Yellowstone, ¿pueden sugerirnos algo sobre la evolución futura del parque? Nosotros pensamos que sí, a pesar de no haberse recogido aun información suficiente para realizar predicciones detalladas. La importancia del vulcanismo y de los fenómenos de levantamiento ocurridos en el pasado, el lapso de tiempo transcurrido entre las erupciones volcánicas, la probable existencia de una importante fuente de calor muy cerca de la superficie, los enjambres de terremotos, el vulcanismo riolítico de la caldera y la rápida velocidad actual de levantamiento son hechos que confirman la posibilidad de una actividad volcánica futura en la meseta de Yellowstone. El flujo de calor elevado y los retardos de las ondas *P* de los movimientos sísmicos, junto con otras pruebas geofísicas, están de acuerdo con la presencia verosímil de magma en la cámara cortical subyacente a la meseta. Los datos de que se dispone no indican el tipo de vulcanismo futuro. Podría tratarse de erupciones relativamente pequeñas de riolita y basalto localizadas en los bordes de la meseta, de erupciones de tipo medio de lava riolítica en el interior de la caldera o bien de una colada de cenizas importante. Cualquier reanudación del vulcanismo en el parque vendría probablemente precedida por fenómenos específicos, como por ejemplo, una actividad sísmica localizada y un incremento de las emisiones de gases. Lo seguro es que, en el futuro, habrá una actividad sísmica, con sacudidas quizá tan fuertes al menos como la del terremoto del lago Hebgen. También se sabe que el fondo de la caldera de Yellowstone continuará deformándose.

Planetas con anillos

Hace pocos años, sólo se conocían los anillos de Saturno. Desde entonces se han decubierto en torno a Urano y Júpiter. Su estructura, tamaño de las partículas componentes y constitución física son objeto de debate

Ignacio R. Ferrín V.

Uno de los planetas más impresionantes del sistema solar y que ejerce mayor fascinación popular es, sin duda, Saturno. Y ello por el sistema de anillos de color blanquecino que lo rodea en su totalidad. Los anillos de Saturno fueron descubiertos en 1610 por Galileo, pero como el telescopio que él utilizaba era pequeño y sus lentes de pobre calidad no llegó a reconocerlos como tales. En efecto, Galileo pensó que se trataba de dos satélites del planeta que lo acompañaban en su trayectoria. Cada 15 años aproximadamente, la Tierra pasa por el plano de los anillos, en cuyo momento éstos desaparecen casi por completo; en esos casos son sólo visibles con los telescopios modernos más poderosos. En 1612 ocurrió una de tales desapariciones, que dejó muy perplejo a Galileo. De hecho, la desaparición de los supuestos satélites se convirtió en uno de los mayores misterios de la astronomía de aquel tiempo.

Se elaboraron toda suerte de teorías para explicar dicha desaparición, algunas de ellas exageradamente complicadas. La solución del misterio fue presentada en forma elegante y simple por Christian Huygens en 1656, quien siguiendo las costumbres de la época la escribió en forma de anagrama. Tres años más tarde el mismo Huygens descifró su propio anagrama: "*Annulo cingitur tenui, plano, nosquam cohaerente, ad eclipticam inclinato*". Es decir: "está rodeado de un anillo delgado y plano, que no toca ningún lado, e inclinado con respecto a la eclíptica". A partir de esa fecha se consideró que el anillo era único y que, además, giraba en forma rígida. Pero en 1675 Cassini, sirviéndose de un telescopio de mejor calidad que la de sus predecesores, observó la existencia de una división obscura. El anillo por tanto era doble. Esta división se conoce desde entonces bajo el nombre de División de Cassini [*véase la fotografía de la página 82*]. La rigidez de los anillos comenzó algo después a preocupar a algunos teóricos, en particular a Laplace, quien en 1785 publicó un trabajo sobre la estabilidad de los anillos. Laplace demostró que un anillo sólido no sería estable. Dicho anillo debería romperse en pedazos y caer sobre el planeta. No podía, sin embargo, descartarse la idea de que los anillos fuesen líquidos. Laplace consideró también la posibilidad de que cada anillo estuviese subdividido en anillos más pequeños y concéntricos, y halló que esta configuración aumentaba la estabilidad.

En 1850 se registró otro avance de importancia en el conocimiento de los anillos. Los hermanos Bond y Tuttle, del Observatorio de Harvard, y Dawes, de Inglaterra, descubrieron independientemente la existencia de otro anillo más interior y débil que los dos primeros, al que llamaron "anillo de Crepé" por su carácter muy tenue. El primer modelo de un anillo compuesto de muchas partículas sólidas aisladas fue elaborado por James Clerk Maxwell en 1856, trabajo que le valió el premio Adams de la Universidad de Cambridge. Maxwell llegó a la conclusión de que un anillo líquido sería estable, resultado que se ha demostrado incorrecto recientemente. Un anillo líquido puede descartarse si se considera la temperatura de equilibrio de cualquier substancia que se encuentre a esa distancia del Sol. Saturno está a 10 unidades astronómicas del Sol (una unidad astronómica es la distancia de la Tierra al Sol) y a esa distancia la temperatura de equilibrio es de unos 90 grados Kelvin (183 grados Celsius bajo cero). A esa temperatura, cualquier substancia de probable existencia en los anillos es sólida. Maxwell consideró igualmente la posibilidad de anillos menores concéntricos, y concluyó que, bajo ciertas condiciones, éstos podían ser estables. El resultado de Maxwell era sin embargo teórico.

En 1895, J. E. Keeler obtuvo una prueba observacional de la no rigidez de los anillos, al recurrir al espectrógrafo para tomar un espectro de los mismos. La interpretación de estos espectros empleando el llamado efecto Doppler demostró que los anillos no se movían en forma rígida. Un anillo rígido daría líneas rectas en el espectro, pero las líneas que Keeler halló estaban inclinadas. Esta observación de gran importancia demostraba sin ambages que los anillos estaban compuestos por muchas partículas, cada una de las cuales se movía alrededor del planeta como si fuera un satélite independiente, partículas que, además, tenían que ser sólidas.

A lo largo de esta época, hubo toda suerte de observaciones falsas, informes de montañas en los anillos, movimientos de éstos, sospechas de que los anillos no eran concéntricos con el planeta, así como el descubrimiento de multitud más de divisiones obscuras, que nunca pudieron ser confirmadas. Todas estas historias han sido recogidas en el excelente libro de A. F. Alexander, "The Planet Saturn". Por ejemplo en 1837, J. F. Encke, director del Observatorio de Berlín, anunció la existencia de una división obscura en el medio del anillo *A*. Esta división, llamada de Encke, la siguen citando algunos investigadores. Pero no existe, y es probablemente consecuencia de una ilusión óptica. En 1970, Guerin, del Observatorio de Pic-Du-Midi, logró tomar una serie de fotografías del planeta, que son actualmente las de mayor resolución que se hayan tomado desde la Tierra. Estas fotografías mostraron otra nueva división más en la parte interior del anillo de Crepé, y la existencia de otro anillo más, de gran debilidad, casi tocando al planeta. Esta nueva división se conoce hoy bajo el nombre de División de Guerin.

En 1970 un grupo de investigadores de la Universidad de Arizona, integrado por C. B. Pilcher, C. R. Chapman, L. A. Lebofsky y H. H. Kieffer dieron cuenta de la existencia de agua en forma de hielo en los anillos. Se llegó a esa conclusión comparando el espectro de los anillos con el espectro del hielo de agua a 90 grados K. Obviamente, esta obser-

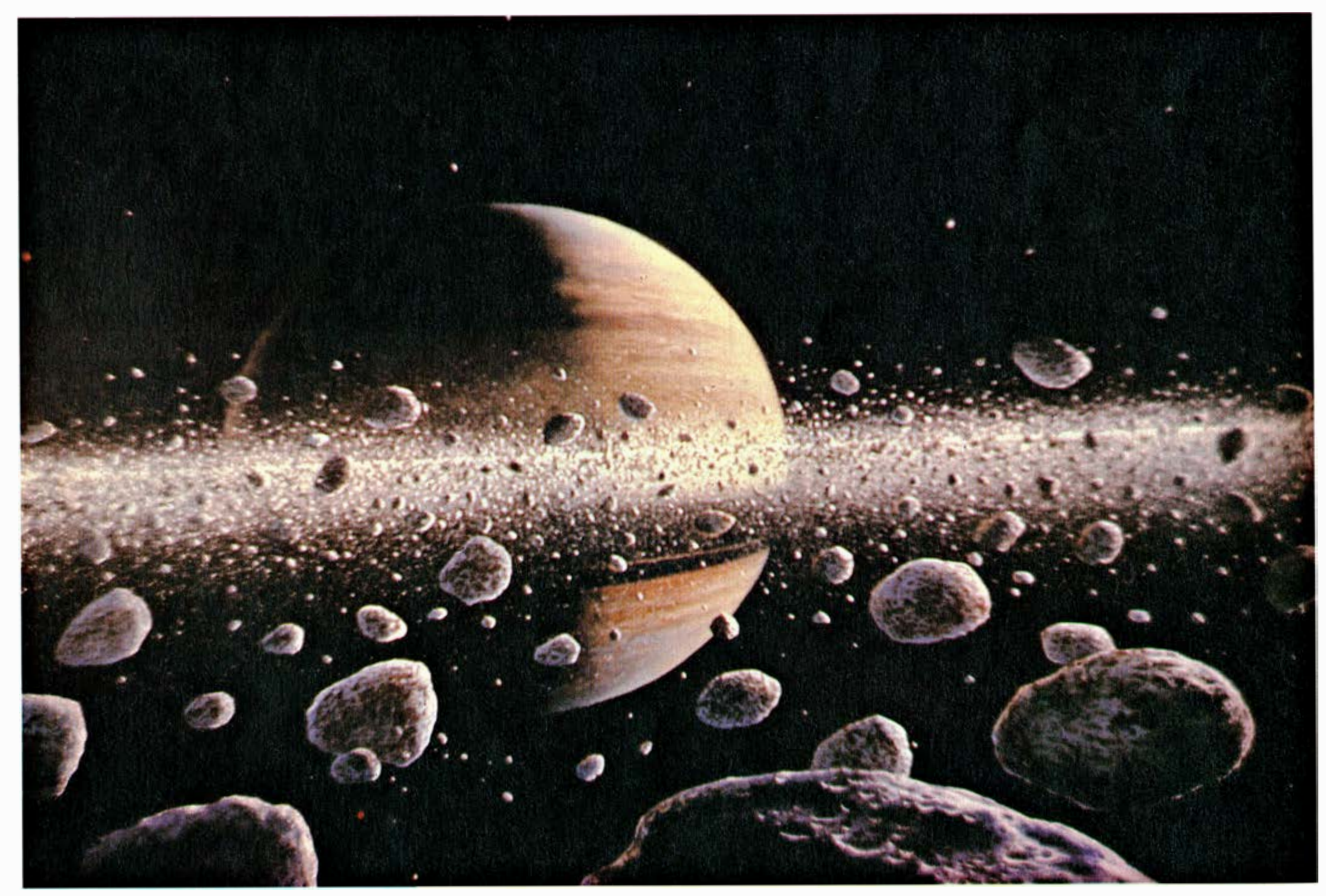
vación no nos dice si las partículas son de hielo puro. Podríamos tener el caso de una partícula de roca densa, cubierta con una delgada capa superficial de hielo de agua. El espectro sería igual en ambos casos, y, por tanto, no puede distinguirse entre ambas posibilidades.

La estructura radial de los anillos, con la notación utilizada, y sus dimensiones, está indicada en la figura de la página 83. Se ha convenido en denotar a los anillos con letras mayúsculas, comenzando por el anillo exterior al cual se le denota *A*, continuando con el más brillante, *B*, el anillo de Crepé, *C*, y finalmente el anillo más interno y débil *D*. Según podemos apreciar el sistema de anillos es de gigantescas proporciones. Mientras que el planeta tiene un radio de 59.700 kilómetros, la parte más exterior del anillo *A* está situada a 137.000 kilómetros del centro del planeta.

Pero parece que el sistema de anillos no termina ahí. En agosto de 1979 el navío espacial norteamericano Pioneer 11 dio cuenta de la existencia de un nuevo anillo más externo y muy delgado, designado por la letra *F*. Y en 1966 Feibelman anunció la existencia de un anillo aún más externo, el *E*, el cual se extendería hasta más allá de 280.000 kilómetros del centro de planeta.

Existe información adicional de interés. Cuando se toma una fotografía astronómica, además de enterarnos de la posición del objeto podemos recibir información sobre la intensidad relativa de sus diferentes partes. Pero esto requiere haber calibrado antes, de un modo cuidadoso, la placa fotográfica utilizada. A los astrónomos les interesa siempre todo lo relativo a la intensidad del objeto. Esa calibración de intensidad se lleva a cabo de una manera rutinaria sobre todas las placas fotográficas. Se puede recobrar la información sobre la intensidad de las diferentes regiones del anillo, si colocamos el negativo sobre un aparato especial denominado microdensitómetro y se utiliza la calibración hecha previamente. Es lo que hemos hecho en el gráfico superior de la página 84; la ilustración muestra un "perfil de intensidad" de los anillos. Puede apreciarse que el anillo *B* es el más brillante, *A* luce menos y el anillo *D* es el menos brillante de todos. Se advierte además la existencia de la División de Cassini y la División de Guerin. Se nota igualmente la ausencia de la División de Encke. Por tratarse de un registro no subjetivo, la División de Encke no será, en consecuencia, real, según habíamos mencionado antes. Puede apreciarse sin embargo la existencia de dos divisiones no tan marcadas en el anillo *A*. Estas divisiones no se observan a simple vista en la foto original.

Evidentemente, una teoría completa de los anillos debería ser capaz de explicar esta curva o perfil de intensidades. Así, cualquiera que sea la teoría evolutiva, ésta deberá poder explicar que el anillo *B* es más intenso que el *A*, y debe hacerlo en la proporción adecuada. Igualmente habrá de ser capaz de explicar que el punto de mayor intensidad de todo el sistema de anillos está ligeramente por debajo de la División de Cassini, en el anillo *B*. Estamos todavía lejos de haber alcanzado tal objetivo, pero investigaciones realizadas por A. Cook y F. Franklin, de los Estados Unidos, han arrojado alguna luz en ese sentido. Suponiendo la ausencia de colisiones entre las partículas, pudieron determinar una curva teórica de densidad de partículas

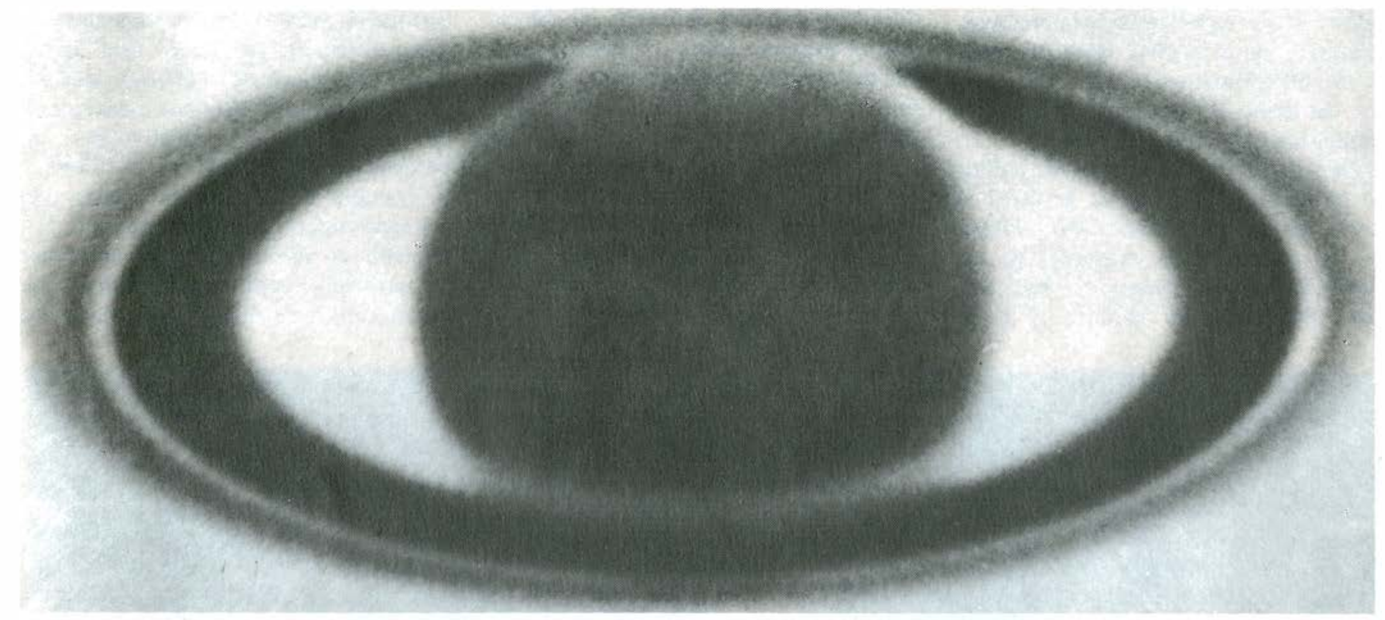


SATURNO visto desde el plano de los anillos. Estos se hallan formados por gran cantidad de partículas individuales, cada una de las cuales gira en una órbita independiente alrededor del planeta. Las partículas tienen tamaños distintos y con frecuencia chocan entre sí, originando polvo y partículas menores por efecto de la colisión. Están constituidas por hielo de agua, a una temperatura de unos 195 grados Celsius bajo cero, pero no hay que excluir la posibilidad de que el hielo de agua sea sólo una capa superficial sobre partículas de roca. Las partículas grandes, ligeramente elongadas, se hallan en rotación sincrónica con Saturno: presentan siempre la misma cara hacia él. La ilustración es una interpretación artística de Don Dixon.

por unidad de área, que coincide bastante bien con la mostrada en la ilustración superior de la página 84. Hasta ahora hemos descrito las características externas del anillo. ¿Cómo se imagina el astrónomo la estructura real interna de los anillos? Hay varias posibilidades sobre este asunto, pero antes de entrar en él desearía describir una parte del método científico que me parece de aplicación en este caso.

Es frecuente que el científico tenga que elaborar un modelo del objeto o sistema que está estudiando. Hay muchas recetas y consejos sobre cómo debe uno comenzar a elaborar dicho modelo. Un requisito necesario para que el modelo elaborado sea correcto es que el investigador logre visualizar lo que está sucediendo en el objeto de su investigación. Lo que estamos tratando de decir es que el investigador debe poseer buena imaginación y ser capaz de "meterse" en el sitio que está estudiando, ya sea éste la red atómica macroscópica de un cristal, el corazón humano o los anillos de Saturno. Debe ser capaz de visualizar todos los procesos, en este caso físicos, que tienen lugar en ese sitio, y que, aunque poco probables, quizá sean de importancia en su modelo. Este ejercicio debe ser exhaustivo: "visualizando" y describiendo todos los fenómenos posibles. Dado ese paso, sólo le resta elaborar una teoría física que contenga lo que se imaginó. Si su fantasía no acierta a dar con lo que está sucediendo, el modelo matemático que diseñe no lo va a contener.

Este método es muy útil en el caso de los anillos de Saturno, aunque naturalmente es aplicable a todas las ciencias en general. De entre las concepciones artísticas que se han publicado a lo largo de varios años sobre la estructura de los anillos, he seleccionado aquella que, a mi juicio, es la que más se asemeja a la realidad. Esa imagen precisa de peque-



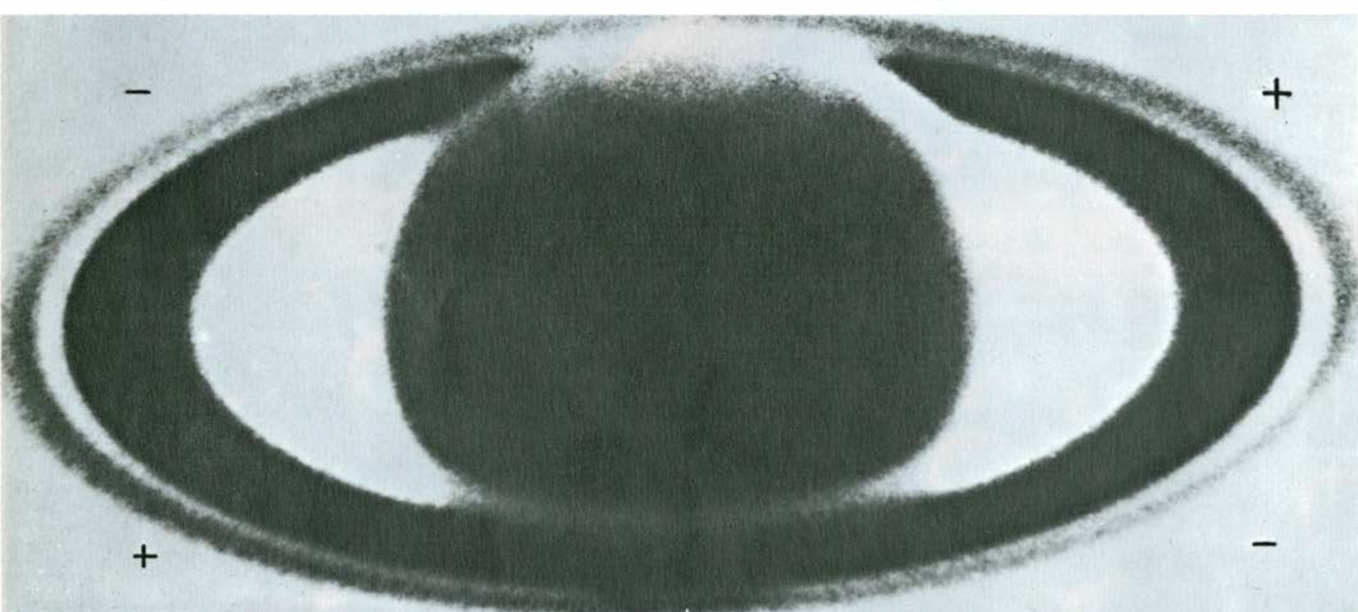
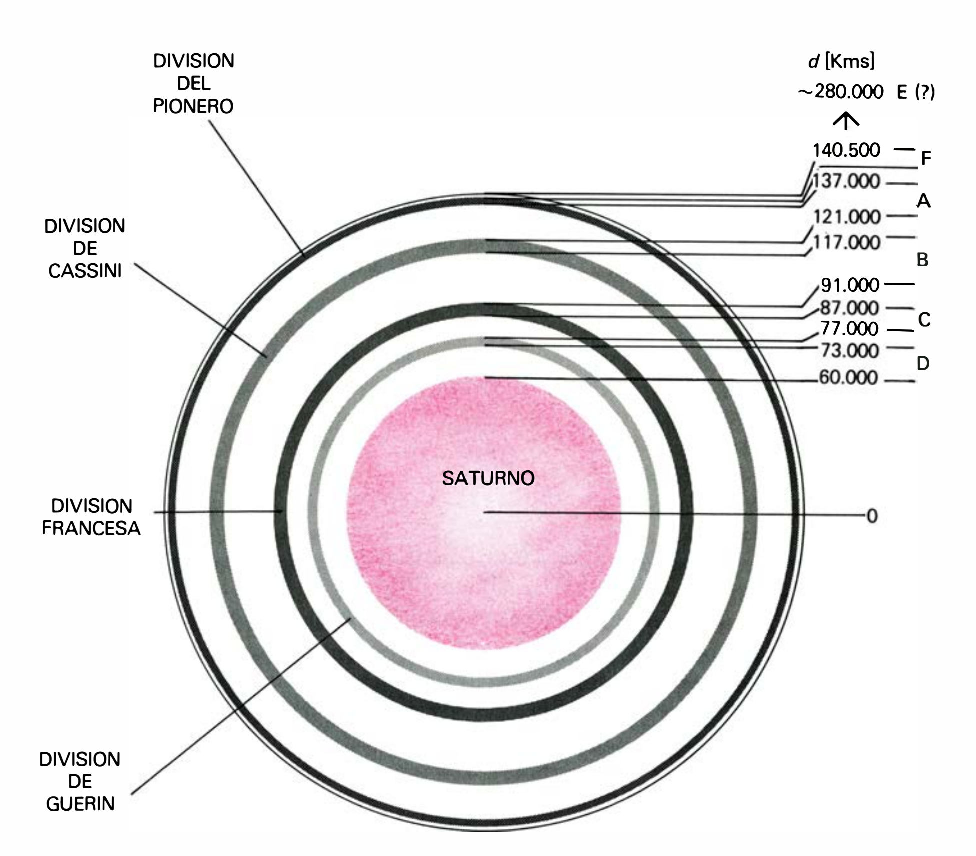


FOTO DE SATURNO, tomada por E. C. Slipher en 1943 en el Observatorio de Lowell, en Flagstaff, Arizona (*arriba*). Se trata de un negativo, no un positivo, de modo que los valores están invertidos: lo blanco es en realidad negro, y viceversa. Los astrónomos usan principalmente negativos porque contienen mayor información. Obsérvese las bandas obscuras sobre el planeta y el casquete polar Sur. Sólo dos anillos son visibles en esta reproducción. El anillo *A*, más externo, y el *B*, más interno y más brillante. Ambos están separados por la división de Cassini, la cual tiene más de 4000 Kms. de ancho. La misma foto de arriba se representa abajo, especialmente procesada para mostrar el efecto azimutal en el anillo *A*. La reproducción es de mayor contraste. Como puede apreciarse, el anillo no tiene igual brillo en los cuatro cuadrantes. Se ha indicado con signos (+) y (–) los cuadrantes de mayor y menor brillo. Si el anillo consta de partículas individuales en rotación sincrónica ¿cómo se aprecia una variación de brillo a su alrededor?

ñas modificaciones. La estructura en cuestión se muestra en la ilustración de la página 81. Habíamos indicado que los anillos están formados por partículas individuales, pero no hemos indicado todavía el tamaño representativo. De ello nos ocuparemos después. Digamos, por ahora, que la situación más probable es que no todas tengan el mismo tamaño, sino que éstas vayan desde las más grandes a las más pequeñas, abundando las partículas pequeñas. Ambas cosas están bien representadas en el dibujo de Don Dixon. Hay, sin embargo, un par de detalles que no recoge esa ilustración. El primero es que las partículas son algo elongadas, elongación que está dirigida hacia Saturno. Esto se aprecia en el dibujo inferior de la página 84 donde hemos representado dos situaciones posibles de la orientación de las partículas individuales de los anillos. A este proceso de orientación hacia el planeta se le llama sincronismo. Las partículas están en rotación sincrónica, y, por tanto, presentan siempre la misma cara al planeta. Este hecho no debe resultarnos extraño a los terrícolas, pues es bien conocido que nuestro satélite, la Luna, presenta siempre la misma cara hacia la Tierra. La Luna constituye, en efecto, un buen ejemplo de rotación sincrónica. De hecho, aproximadamente el 90 por ciento de los satélites del sistema solar están en rotación sincrónica con respecto a sus planetas primarios. El segundo hecho que debo mencionar es que, según las leyes de la física (en particular la ley de conservación del momento), las partículas mayores están situadas en el plano central del anillo, mientras que las más pequeñas están situadas a alturas mayores sobre este plano. Ese fenómeno recibe el nombre de "estratificación". Una analogía popular de esto es que las cosas más pesadas caen hacia el fondo, mientras que las más livianas se colocan en la superficie. Con estas dos correcciones, la situación representada en el dibujo de la página 81 se aproxima a la realidad.

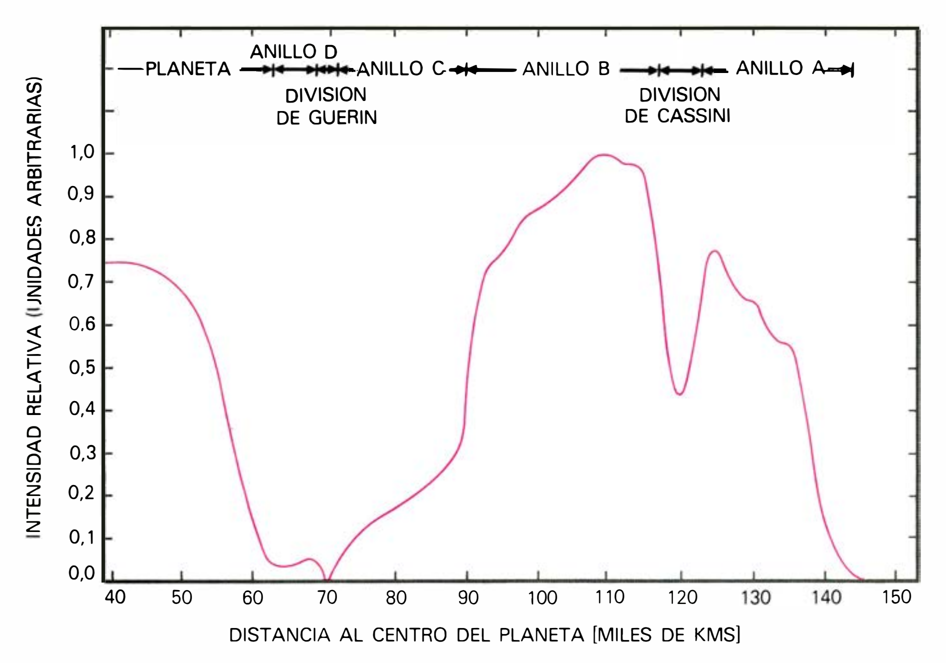


DIMENSIONES Y NOTACION de los anillos de Saturno. El planeta y los anillos están vistos desde el polo norte de ambos. El navío espacial Pionero, que pasó en agosto de 1979 por Saturno, descubrió la existencia de un nuevo anillo muy estrecho, designado por la letra *F*, y dos nuevas divisiones obscuras: la División del Pionero y la División Francesa. El anillo *E*, aunque ya ha sido identificado y es de gigantescas proporciones, es muy tenue; ello explica que todavía no haya podido ser confirmado.

¿Cómo ha de verse el movimiento de las partículas? Los satélites del planeta mueven a las partículas en dirección vertical, y, por las leyes de Kepler del movimiento, sabemos que las partículas deben moverse alrededor del planeta, siendo mayor la velocidad de las más cercanas a éste. Evidentemente, de tiempo en tiempo habrá colisiones entre ellas, que quizá resulten muy aparatosas. Es posible que el polvo y las partículas más pequeñas sean el resultado de estas colisiones. Este proceso ha continuado ininterrumpido desde el origen de los anillos, hace aproximadamente unos 4500 millones de años. Algunos astrofísicos sostienen que la formación de los mismos es más reciente.

A propósito de la estructura de los anillos podemos preguntarnos también sobre la fracción de área cubierta por las partículas. ¿Cómo puede determinarse esta cantidad? Las partículas pueden estar o muy cercanas o muy separadas entre sí, y sería interesante despejar ese interrogante. Es de esperar que como los anillos *A*, *B* y *C* no son de igual brillo, la densidad de las partículas varíe con la distancia al planeta. Y eso es exactamente lo que sucede, según veremos. Por fortuna puede determinarse esta cantidad con relativa facilidad. Si se examina la fotografía de la página 82, se apreciará que el planeta es parcialmente visible a través del anillo *A*. En efecto, en la región donde el anillo *A* cruza sobre el planeta, el brillo del anillo parece mayor. Ello nos demuestra que el anillo *A* es parcialmente transparente. Aun cuando la probabilidad de que una estrella pase detrás de los anillos es muy pequeña, en las pocas ocasiones en que esto ha sucedido se ha podido observar que la estrella no ha desaparecido totalmente, lo que constituye una nueva confirmación de la conclusión anterior. Por medio de estas observaciones se ha logrado deducir que el anillo *B* posee la mayor densidad de partículas por unidad de área, siguiéndole el anillo *A*, y después el *C* y el *D*. Los anillos *C* y *D* son casi totalmente transparentes.

Recientemente he llevado a cabo un estudio de este problema, utilizando la visibilidad del planeta a través de los anillos para recabar alguna información sobre la densidad de las partículas por unidad de área. Pero antes de presentar este resultado, debo mencionar que los astrónomos no utilizan directamente esta cantidad, sino una variable relacionada con ella que se denomina "espesor óptico". El espesor óptico es el mismo que emplean los físicos, y su significado es muy simple. Supongamos que tenemos una región del espacio con partículas en suspensión, y que hay muy pocas de ellas por unidad de área. Un haz de luz que trate de atravesarlo pasará sin mucha dificultad. Al límite de cero partículas por unidad de área, le corresponderá un valor de espesor óptico igual a cero. Imaginemos ahora que el número de partículas por unidad de área sea tan grande que no pase ninguna luz. El espesor óptico será entonces infinito. A casos intermedios en que sólo se transmite parte del haz de luz, le corresponden valores intermedios del espesor óptico. Para espesor óptico igual a 1,0, el área es de un 63 por ciento. No hay

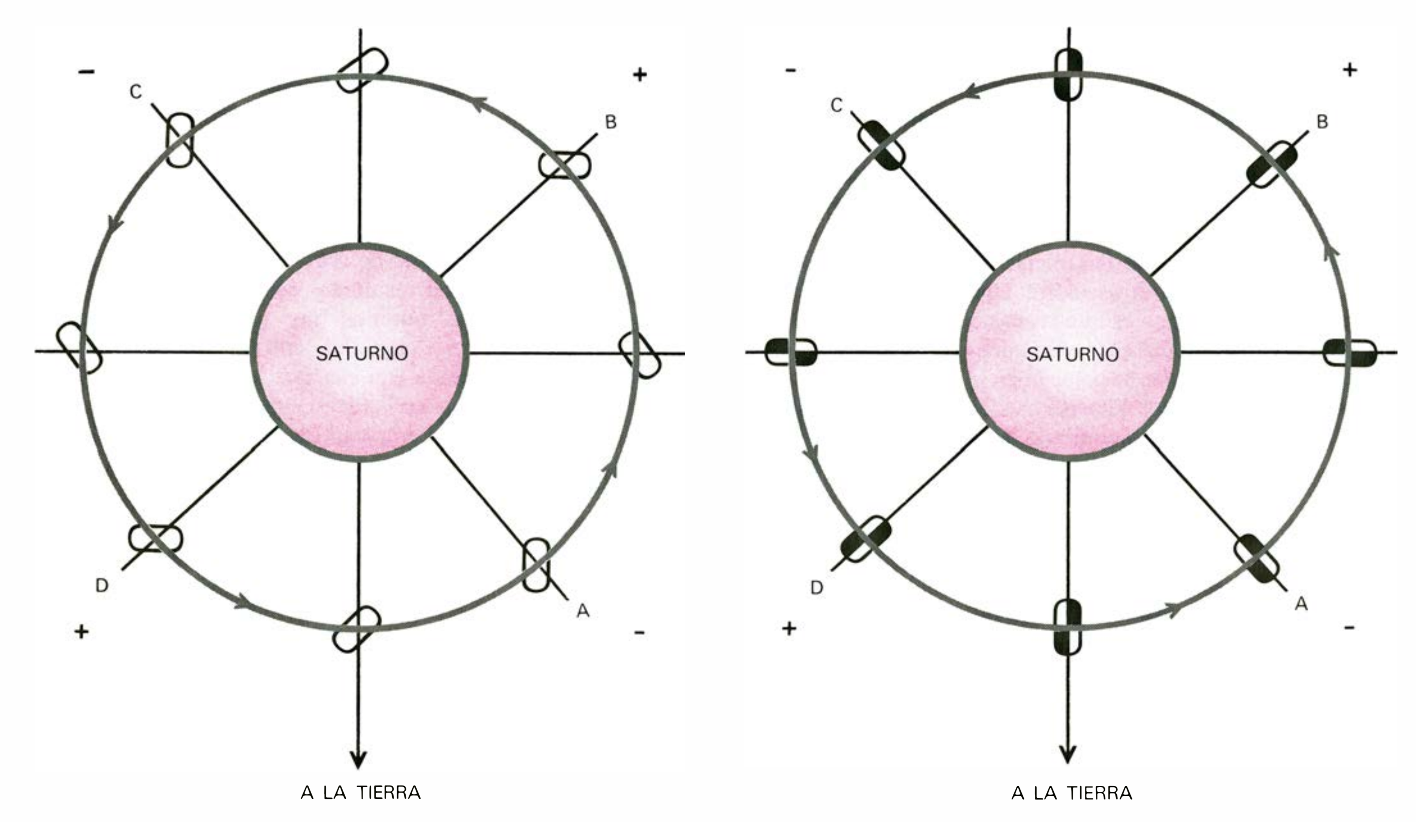


PERFIL DE BRILLO de los anillos de Saturno. Este perfil, cuya paternidad corresponde a Guerin y fue deducido por él a partir de fotos de alta resolución tomadas en el Observatorio de Pic-Du-Midi, en Francia. El perfil se obtiene tomando un rastreo de la intensidad del anillo a lo largo del eje mayor de la elipse de éstos, con un instrumento llamado "microdensitómetro". Puede apreciarse con toda claridad la correspondencia de la intensidad con las fotografías de los anillos que aparecen en la página 82.

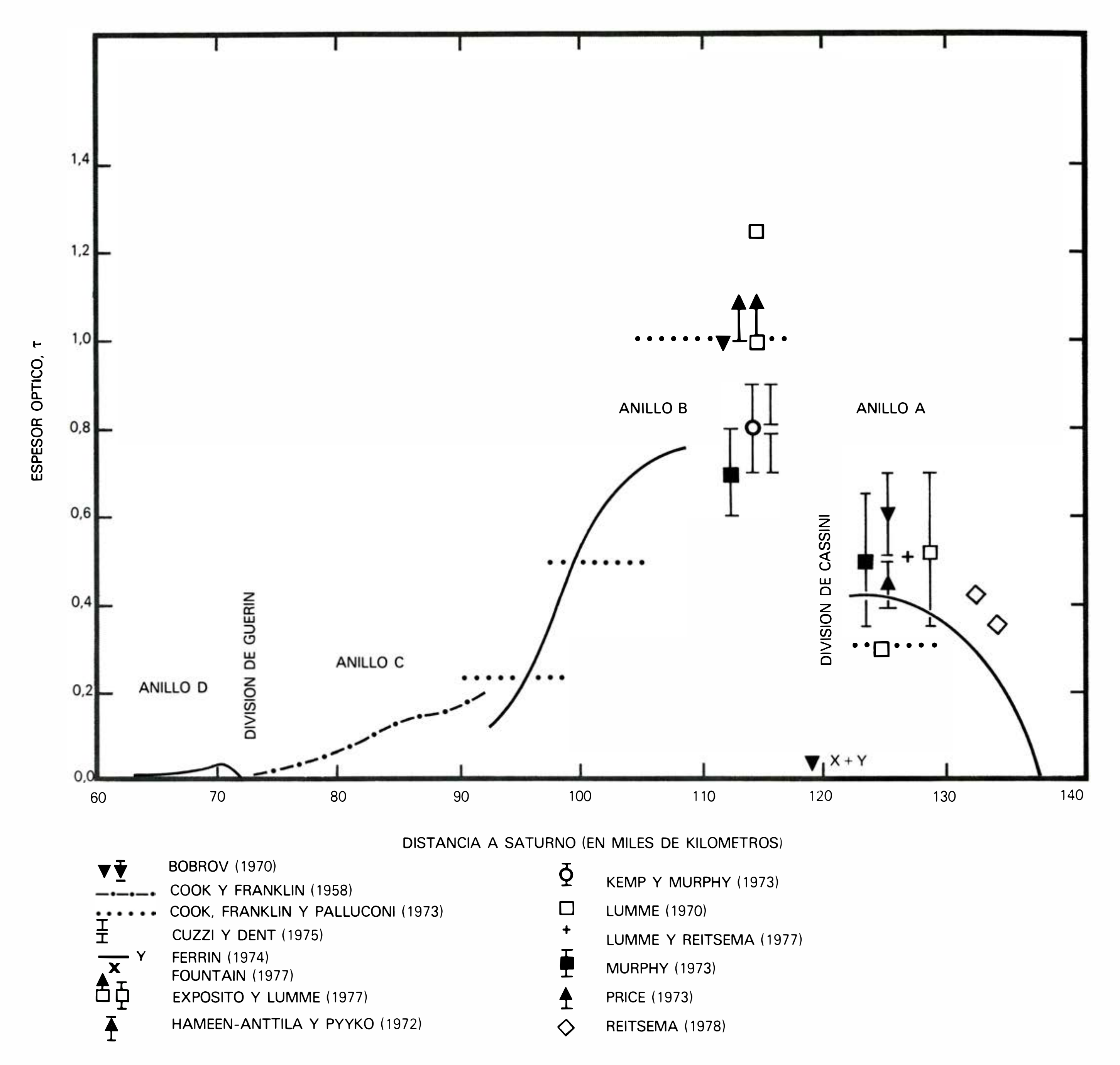
dificultad en transformar estos valores en área cubierta por las partículas sobre área total. Es decir, el espesor óptico nos da una idea de cuánta área efectiva cubren las partículas. Vemos pues que el espesor óptico varía de cero a infinito. El estudio que he realizado dio los valores contenidos en el gráfico de la página siguiente para el espesor óptico. En ese gráfico he indicado además los valores obtenidos por otros autores. Se ve que tenemos una idea más o menos aproximada de cómo varía el espesor óptico con la distancia al planeta. Este resultado es de gran importancia en la determinación del tamaño medio de las partículas, según veremos después.

Es interesante comparar el perfil de intensidad y la curva de espesor óptico. Se aprecia una correlación fuerte entre ambas, como era de esperarse de acuerdo con las leyes de la física. En efecto, si el espesor óptico se aproxima a cero, indica que hay muy pocas partículas por unidad de área, lo que puede expresarse también diciendo que las partículas cubren poca superficie del área total. Por tanto deben reflejar escasa luz, y ese anillo o región debe ser débil. Esto es lo que se observa en los anillos *C* y *D*. Por otra parte, si el espesor óptico es grande (pongamos por caso cercano a uno), ello indica que hay una gran cantidad de partículas por unidad de área y que, por tanto, cubrirán una fracción apreciable de la superficie total. De ello resultaría que esas partículas reflejarían mucho la luz del Sol; esa región, pues, sería brillante. Y eso es precisamente lo que se observa en los anillos *B* y *A*. El acuerdo entre estas dos figuras nos señala que no debemos andar muy errados.

Uno de los problemas más difíciles de resolver es el del tamaño de las partículas que componen los anillos. Evidentemente, este tamaño debe estar relacionado con el espesor geométrico



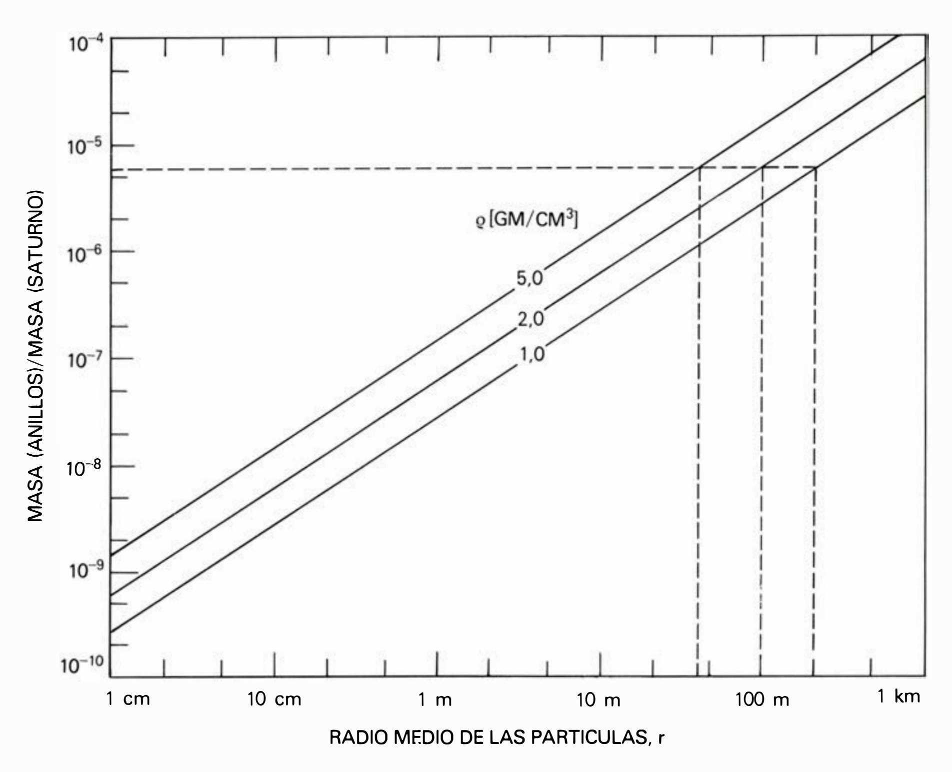
DOS EXPLICACIONES posibles del efecto azimutal del anillo *A* de Saturno. En el dibujo izquierdo, las partículas del anillo no están orientadas directamente al planeta, sino desviadas ligeramente de él. Las partículas son uniformemente brillantes; en consecuencia, vistas desde la Tierra, son más luminosas en las posiciones *B* y *D* que en las posiciones *C* y *A*. El efecto de casi-orientación se debe a la influencia mutua gravitacional entre las partículas. Este modelo fue ideado por Colombo, Goldreich y Harris. En el dibujo de la derecha, las partículas están perfectamente orientadas hacia el planeta, pero no brillan uniformemente; presentan una estructura como la de la figura siguiente. El anillo brilla más en *B* y *D* que en *A* y *C*.



ESPESOR OPTICO de los anillos de Saturno. El espesor óptico constituye una medida de la densidad de las partículas por unidad de área. Así, un espesor óptico igual a cero equivale a cero partículas por unidad de área; un espesor óptico igual a infinito equivale a una superficie sólida que no deja pasar la luz. En esta figura están recogidas todas las medidas del espesor óptico publicadas hasta la fecha. Nótese que el anillo *B* es el que tiene un valor mayor, mientras que el anillo *D* tiene un valor muy bajo. Resulta interesante comparar esta figura con el perfil de los anillos de la página 84.

de los mismos. Pero la propia determinación del espesor real de los anillos encierra gran dificultad. Vamos a dar una idea de esa dificultad, usando una analogía. Supóngase que hay que determinar el espesor de una hoja de esta revista, con la particularidad de que esta hoja se halla situada a unos 350 kilómetros de distancia. Esta es aproximadamente la situación del astrónomo con respecto a los anillos de Saturno. Aun cuando la hoja se presente de canto, los telescopios más potentes no serán capaces de ver el espesor como tal. Hay pues que recurrir a métodos indirectos. Se requiere mucho ingenio para descubrir estos métodos y relacionar los valores medidos con el tamaño de las partículas.

El método más obvio para medir el espesor de los anillos consiste en calcular la poquísima luz residual que llega de ellos cuando se presentan completamente de canto (lo que en nuestra analogía correspondería a medir la luz que se refleja del borde de la hoja de papel, situada a 350 kilómetros de distancia). Habíamos indicado con anterioridad que esto sucede una vez cada 15 años. La última ocasión en que esta imagen se presentó fue en 1966. Varios grupos de observadores determinaron el espesor de los anillos de esta manera. Así, J. H. Focas y A. Dollfus, de Francia, obtuvieron un valor de 2,8 ± 1,5 kilómetros, R. L. Kiladze, de la Unión Soviética, obtuvo un valor de 1,6 ± 0,5 kilómetros, y un reciente análisis por J. W. Fountain, de Estados Unidos, dio 1,3 ± 0,3 kilómetros. Considerando la dificultad de la medición, estos valores están en buen acuerdo entre sí. El promedio redondeado de estos valores da 1,6 kilómetros. El tamaño de las partículas tiene que ser menor o igual que el valor del espesor de los anillos. Dicho de otro modo, hemos encontrado un límite superior para el tamaño de las partículas, y este límite vale aproximadamente 1,6 ki-



RELACION ENTRE LA MASA TOTAL DE ANILLOS y el radio medio de las partículas, deducida a partir del espesor óptico de los anillos. Esta relación se ofrece aquí para tres posibles densidades de las partículas: 1,0, 2,0 y 5,0 gramos por centímetro cúbico. La masa del anillo se ha expresado en unidades de la masa del planeta. Las mejores mediciones obtenidas hasta hoy parecen indicar que la masa de los anillos es de 6 millonésimas de la masa de Saturno. Esto corresponde a diámetros de las partículas de 100, 200 y 400 metros, para densidades respectivas de 5,0, 2,0 y 1,0 gramos por centímetro cúbico.

lómetros. Pero puede ser mucho menor. ¿Cómo determinarlo?

Uno de los astrónomos que más ha trabajado en este problema ha sido James B. Pollack, de la NASA. Con objeto de obtener una determinación de dicho tamaño, Pollack utilizó observaciones de radio y de radar, realizadas por diferentes grupos en los Estados Unidos. Del análisis de estos datos, demasiado complicado para describirlo aquí, resulta que las partículas deberían ser pequeñas, de un tamaño típico de unos 10 centímetros. Pero podría haber partículas que alcancen tamaños de un metro de diámetro, o más. Dicho resultado depende, sin embargo, de la composición de las partículas de los anillos, así como de sus propiedades de emisión de ondas de radio y dispersión de ondas de radar. Recientemente he ideado un método bastante directo, que no hace uso de propiedades desconocidas ni depende de la emisión o dispersión de ondas de radio. Al reducir a un mínimo las variables físicas desconocidas, este método debería ser más preciso.

El método se basa en la curva de espesor óptico que dimos en la ilustración de la página anterior y en una determinación reciente de las masas de los anillos obtenida por W. I. McLaughlin y T. D. Talbot, del Laboratorio de Propulsión Jet, en California. McLaughlin y Talbot usaron medidas muy precisas de las posiciones de los satélites de Saturno, para inferir la perturbación gravitacional de los anillos sobre estos satélites. Esta perturbación es muy débil, pero como se tenían varios satélites disponibles pudo determinarse con gran precisión. Calculada la masa total de los anillos, resultó ser de 6,2 millonésimas de la masa del planeta Saturno. ¿Cómo interviene ese valor en la estimación del tamaño medio de las partículas?

Habíamos indicado anteriormente que el gráfico de espesor óptico contra posición en los anillos era una función de la superficie efectiva cubierta por las partículas. Ello implica que el gráfico es una función de πr^2, donde r es el radio promedio de las partículas supuestas esféricas. Por otra parte, la masa de los anillos tiene que ser una función de la densidad de cada partícula por el volumen de una partícula promedio, o sea (densidad) $\times$ $(\pi \times 4/3 \times r^3)$. Se puede eliminar la dependencia del radio en esta última ecuación, usando las observaciones del espesor óptico. El resultado es una relación lineal entre la masa de los anillos y el tamaño promedio de las partículas. Dicha relación lineal se muestra para diferentes densidades en la ilustración superior.

La determinación del tamaño de las partículas es ahora trivial, usando el valor de la masa de McLaughlin y Talbot. Con los valores de estos autores, y a partir del gráfico en cuestión, se determinan radios promedios de 50, 100 y 200 metros para densidades de 5,0, 2,0 y 1,0 gramos por centímetro cúbico. De ello se deduce que el espesor del anillo es varias veces el tamaño de una partícula promedio. Por encima de las partículas promedio se hallan las pequeñas que, en virtud de las leyes de conservación de momento de la física, deben alcanzar un espesor geométrico más elevado que las partículas grandes. Hace algún tiempo, cuando expliqué esta teoría a un amigo mío biólogo, éste no pudo reprimir la risa porque me referí a rocas de 100 metros de tamaño como "partículas". El estaba acostumbrado a llamar "partículas" a objetos muy pequeños, de tamaño microscópico. Debemos recordar, sin embargo, que desde el punto de vista de la astronomía un objeto de varios cientos de metros de tamaño es totalmente despreciable, y de ahí que todavía se le designe como "partícula".

¿Cómo se reconcilia este valor con el de Pollack? Obviamente, en el sistema de anillos de Saturno habrá una distribución de tamaños, y no una sola clase de partículas. Las mediciones de radar y de radio son más sensibles a las partículas pequeñas; por tanto, el valor promedio se desplazará hacia valores menores. Pero nuestro razonamiento no depende de cantidades desconocidas; el método es más directo y menos expuesto a error. Hemos de advertir de antemano que los resultados promedios son engañosos, y que lo más probable es una situación con partículas desde varios cientos de metros de diámetro hasta partículas del tamaño de centímetros, todas ellas coexistiendo y moviéndose juntas. Estas últimas podrían ser el resultado de las colisiones.

Otro efecto sorprendente de los anillos, estudiado recientemente por diversos investigadores, es el llamado "efecto azimutal". En la fotografía de la página 82, se puede apreciar que el anillo *A* no muestra la misma intensidad en los cuatro cuadrantes. Hemos marcado en ella los cuadrantes que son más intensos y los que son menos. La foto, de gran calidad, permite suponer que el efecto no es ficticio. En 1974 este fenómeno fue estudiado por mí en forma cuantitativa. Una investigación bibliográfica me mostró que había sido descubierto originalmente por H. Camichel en Francia en 1958. Curiosamente, el efecto no se manifiesta en el anillo *B*.

¿Cómo explicar este fenómeno? Hay

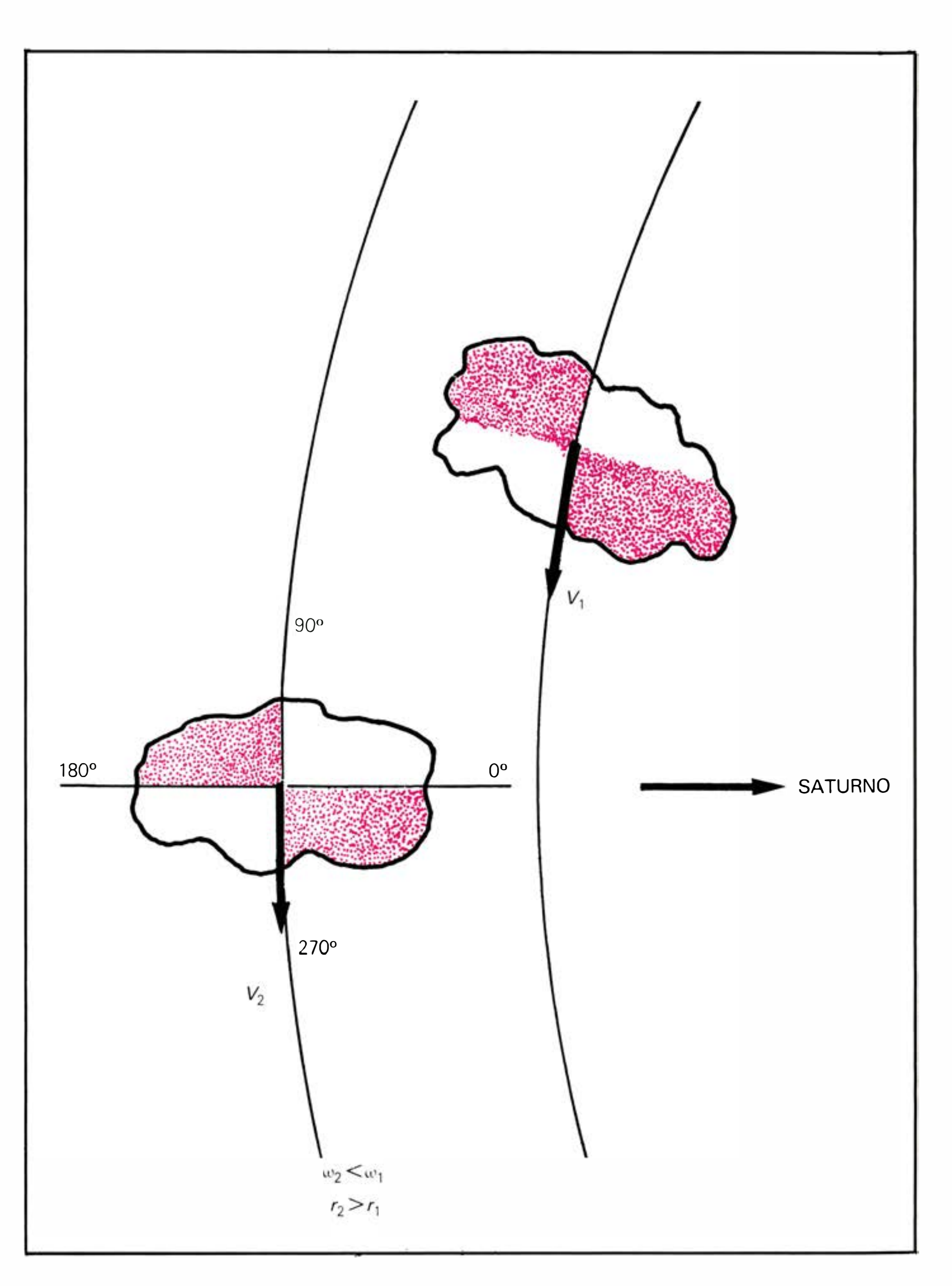
varias posibilidades. La primera de ellas, razonada por G. Colombo, P. Goldreich y A. W. Harris, del Instituto de Tecnología de California, establece una analogía con las interacciones gravitacionales en los brazos espirales de las galaxias. Para comprender este mecanismo, es necesario suponer que las partículas que componen el anillo *A*, y que son grandes, no están perfectamente orientadas hacia el planeta según se ve en el diagrama inferior de la página 84. La orientación es siempre hacia la derecha del planeta; así, cuando las partículas están en diferentes cuadrantes vistos desde la Tierra, presentan diferente área superficial. De esta manera su brillo no es uniforme alrededor de todo el anillo. La desviación de una posición totalmente dirigida hacia el planeta obedece a la interacción gravitacional entre las partículas y las colisiones entre ellas.

Otra posible explicación, en términos de una variación de densidad en el anillo, es la dada por Franklin y Colombo. Esta explicación no requiere partículas orientadas hacia el planeta. Las variaciones de densidad serán producidas por interacciones gravitacionales entre las partículas, que producirían regiones con mayor o menor número de ellas por unidad de área.

He encontrado que existe una tercera posibilidad no considerada por los autores anteriores y la cual se muestra también en el diagrama inferior de la página 84. Consideremos dos partículas grandes, que se mueven en órbitas más o menos circulares alrededor de Saturno, y vistas desde arriba, según se aprecia en el diagrama de la derecha. La partícula más cercana debe desplazarse a mayor velocidad que la más lejana, de acuerdo con la tercera ley de Kepler, que dice: Los cuadrados de los períodos de revolución de dos planetas guardan entre sí la misma relación que los cubos de los semiejes mayores de las órbitas correspondientes. Consideremos la partícula más externa, designada en dicha ilustración por el número 2. Esa partícula sólo podrá ser golpeada en el cuadrante de 0 grados a 90 grados por una partícula más interna. De igual manera, como ella se mueve más rápido que la partícula 3, aquella golpeará a la partícula 3 en el cuadrante de 180 grados a 270 grados. Así pues, las colisiones sólo pueden ocurrir en los cuadrantes primero y tercero. Pero no hay forma de que esto ocurra en colisiones en los cuadrantes dos y cuatro. Estos cuadrantes son inaccesibles. Vemos así que se produce una partícula que tiene propiedades superficiales diferentes, por efectos de las colisiones. Estas pueden haber ocurrido en el pasado y no tener por qué continuar en la actualidad. Cuando esa partícula se pone a girar en rotación sincrónica alrededor de los anillos, producirán un efecto azimutal que es semejante al observado.

Una implicación muy importante de esta última hipótesis es que, para que el modelo funcione, es necesario que cada partícula mantenga su posición radial con respecto a las demás. El anillo por tanto debería ser como el mostrado en la figura de la página siguiente. ¡Esto es, el anillo *A* estaría formado por anillos más pequeños, de acuerdo con lo sugerido por Laplace hace 195 años! Los tres modelos anteriores explican el fenómeno. ¿Cuál es el correcto? La solución decisiva deberá esperar observaciones más directas.

El día 10 de marzo de 1977, Urano ocultó la estrella número 158687 del catálogo SAO. Estas ocultaciones son importantes dado que permiten obtener información sobre la atmósfera del planeta. Varios grupos de investigadores planearon la observación del evento. Lo más sorprendente fue que, aproximadamente media hora antes de la ocultación, la estrella comenzó a perder brillo por cortos intervalos de tiempo. De acuerdo con las observaciones realizadas



DOS PARTICULAS QUE ESTAN A PUNTO DE CHOCAR en los anillos. La partícula 1 se encuentra más cerca del planeta; se mueve, pues, más rápidamente que la partícula 2. Por tanto, la colisión sólo puede ocurrir en el primer cuadrante de la segunda partícula (0 grados a 90 grados) y en el tercer cuadrante de la primera partícula (180 grados a 270 grados). No hay forma de que el segundo cuadrante (90 grados a 180 grados) o el tercero (270 grados a 360 grados) pueda ser alcanzado por las colisiones, si las partículas mantienen su posición radial. Adviértase que esas posibles colisiones producen regiones brillantes sobre las partículas. Esto resulta coherente con la variación en el anillo *A*.

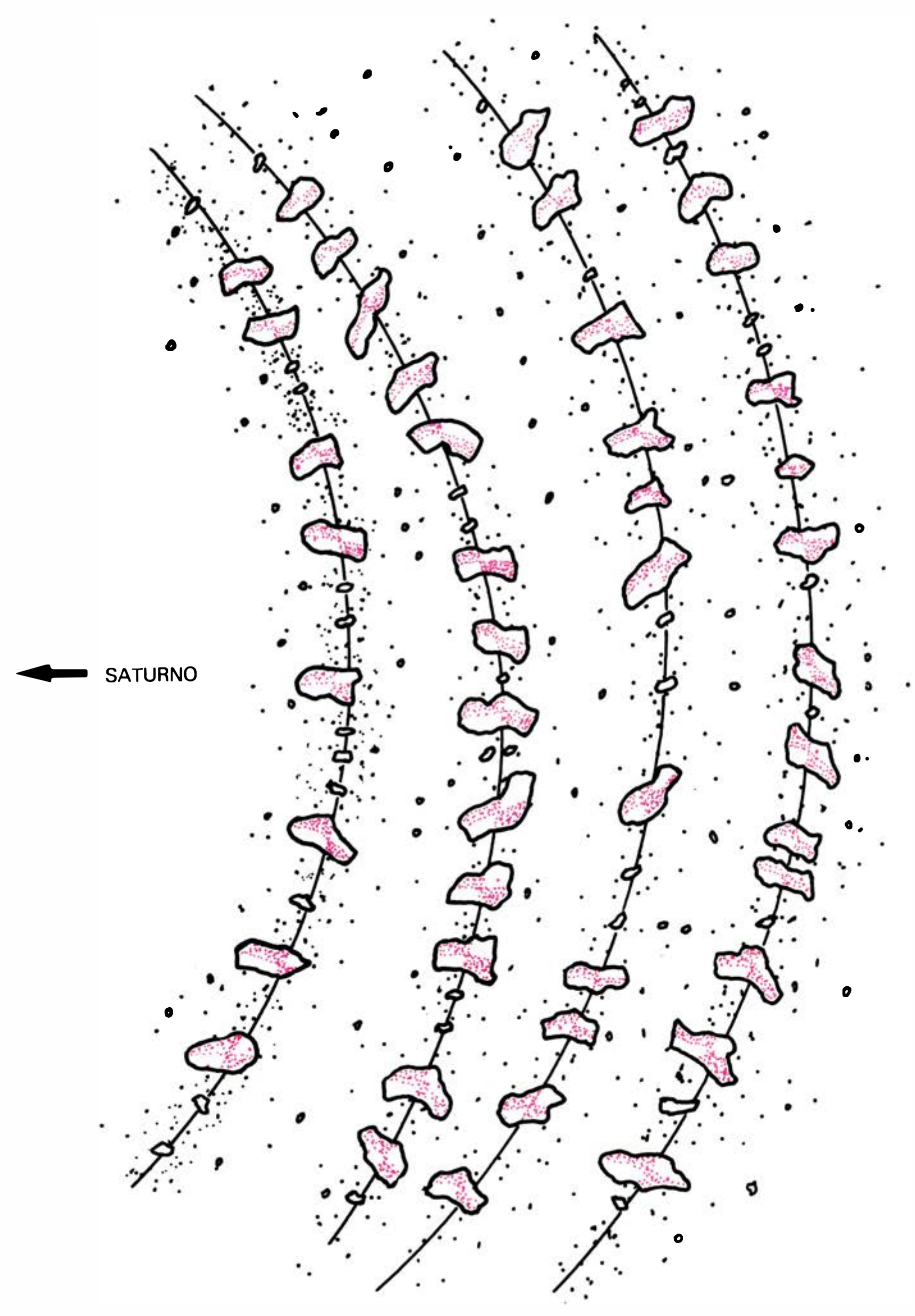
por Elliot, Dunham y Mink, hubo cinco acontecimientos designados por las letras griegas alfa (α), beta (β), gamma (γ), delta (δ) y epsilón (ε). Estos sucesos se repitieron en forma simétrica, pero invertidos, del otro lado del planeta, atestiguando de esta forma que no eran ficticios, o producto de fallos instrumentales. La explicación más razonable para estos eventos es que la luz de la estrella se atenuaba por anillos muy estrechos situados alrededor de Urano. Cuando toda la información fue recopilada, se encontró que existen varios anillos más, desiguales: eta (η), 4, 5 y 6. En total parece haber 9 anillos, situados como se muestra en la ilustración superior de la página siguiente. El anillo ε tiene la peculiaridad de no ser circular, sino elíptico. Sigue sin saberse la razón de ello. En la tabla de la página opuesta se indica el radio orbital al que está situado el anillo dado y su ancho.

En relación con los anillos de Urano, hay dos hechos fundamentales que necesitan explicarse. El primero de ellos es por qué cada anillo está situado a la distancia que ha sido observada, y el segundo es la razón de que estos anillos sean tan finos. Nótese que la mayoría de ellos apenas miden 10 kilómetros de diámetro y sólo el anillo ε tiene 40 o 50 kilómetros de ancho. Otra cuestión interesante es el tamaño y la textura de las partículas que los componen.

Empecemos por el final. La estrella que se ocultó el 10 de marzo tenía, a partir de la distancia de Urano, un tamaño aparente de unos cuatro kilómetros. Como en ningún caso la estrella desapareció por completo, se deduce que las partículas de los anillos alcanzan a lo sumo un tamaño de cuatro kilómetros. Tenemos, pues, un límite superior. El hecho de que los anillos no sean observables todavía con los telescopios visuales más potentes se debe, en parte, a su escasa anchura y, en parte también, a que su reflectividad es muy baja. Comparativamente hablando, el material que compone los anillos es más obscuro que el material lunar que, a su vez, constituye el material más obscuro del sistema solar. De modo que podemos concluir que los anillos de Urano, al contrario de los de Saturno, no están cubiertos de hielo, sino que son probablemente roca desnuda.

En lo que respecta a la posición de los anillos, hay varias teorías en pugna. Todas ellas parten de un cálculo teórico de las fuerzas ejercidas por los satélites del planeta sobre una partícula hipotética situada a determinada distancia de éste. Si las condiciones son favorables, dichas fuerzas no interfieren la órbita de la partícula, y entonces esa órbita es permitida, o está en "resonancia". Pero en la mayoría de los casos las fuerzas de los satélites no permiten que la partícula permanezca en esa posición en forma estable, a medida que transcurre el tiempo. La órbita entonces no es permitida, y hay "zonas vacías", separadas por regiones estrechas de órbitas permitidas. Pero ni siquiera en los modelos más complicados donde se hace uso de esta teoría es posible explicar la posición de todos los anillos observados, sino sólo de algunos de ellos. En el último artículo publicado sobre este asunto, se lograba explicar la posición de todos los anillos sólo si se postulaba la existencia de un satélite desconocido no observado, situado en una posición interior al resto de los satélites. De modo que este asunto está todavía en discusión.

Una comparación entre los dos sistemas de anillos muestra que difieren mucho entre sí. La divergencia más notable entre ambos estriba en que los anillos de Saturno son muy anchos y brillantes, mientras que los de Urano son muy débiles y estrechos. ¿Cómo puede mantenerse un anillo de menos de 10 kilómetros de ancho, a una distancia de unos 45.000 kilómetros del planeta, pese



POSIBLE ESTRUCTURA DE LOS ANILLOS, necesaria para que la explicación de la ilustración de la página 87 sea correcta. En esta configuración, las partículas se mueven ordenadamente en subanillos concéntricos. Las partículas son ligeramente elongadas, y, en promedio, apuntan a Saturno, manteniendo la rotación sincrónica. (Un caso familiar de rotación sincrónica es la de la Luna y la Tierra.) Hay una envoltura de partículas más pequeñas que rodea a los anillos; éstas ayudan a eliminar las oscilaciones y a aumentar la estabilidad del sistema. Las partículas grandes muestran efecto azimutal.

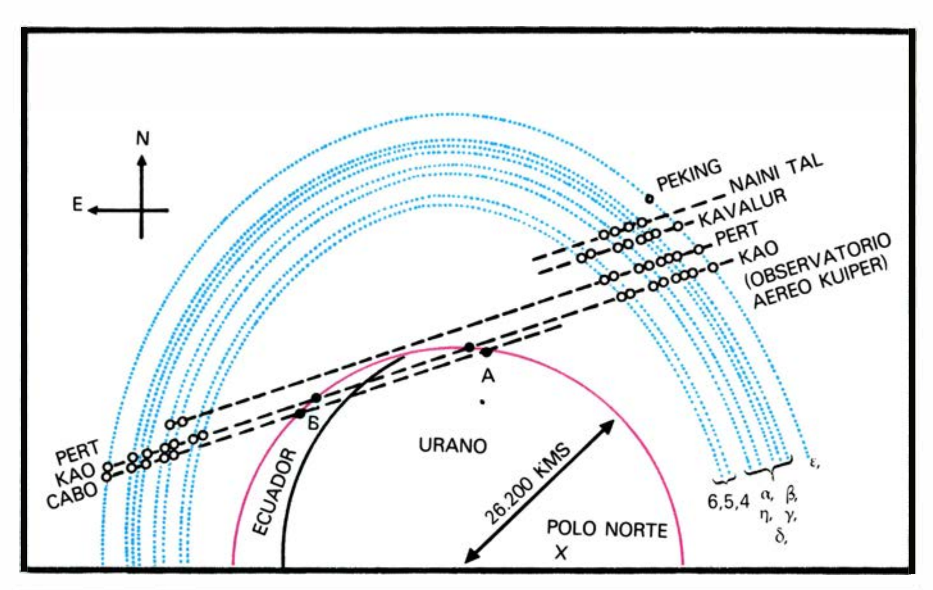
a las fuerzas perturbadoras que tratan de romperlo? ¿Cómo pueden existir anillos tan juntos entre sí, sin que se unan para formar uno sólo?

Podemos apreciar que los anillos de Urano han complicado aún más la situación, en lugar de aclararla. Vale la pena señalar aquí que, antes de que se descubriesen los anillos de Urano, varias teorías y modelos físicos habían predicho que no podrían existir anillos de una estrechez del orden de los 10 kilómetros de ancho. ¡Pero la naturaleza hace caso omiso de nuestros argumentos teóricos! ¡No debemos olvidar que hace algunas décadas "se demostró" con argumentos teóricos que la mosca no podía volar!

En el mes de marzo de 1979 el navío Viajero 1 se encontraba a su mínima distancia del planeta Júpiter. En ese momento tomó fotos del planeta y de los satélites, que aportó información nueva y desconcertante sobre estos cuerpos celestes. Pero uno de los momentos de mayor interés ocurrió cuando el Viajero 1 comenzó a detectar materia dispersa dentro de la órbita de Amaltea, el satélite más cercano a Júpiter. Cuando el navío pasó por el plano ecuatorial del planeta, la cámara fotográfica permaneció abierta por espacio de 11,2 minutos con objeto de fotografiar algún posible anillo de materia, aunque esta posibilidad era muy remota. Pero la foto mostró una línea delgada y clara, que sólo puede ser interpretada como un anillo. La poca información que se posee sobre él indica que estaría formado por rocas grandes, y que su espesor máximo sería de aproximadamente 30 kilómetros. Con este espesor y su cercanía al planeta, es totalmente invisible desde la Tierra. La primera foto del anillo tomada por el navío Viajero 1 se muestra a la derecha.

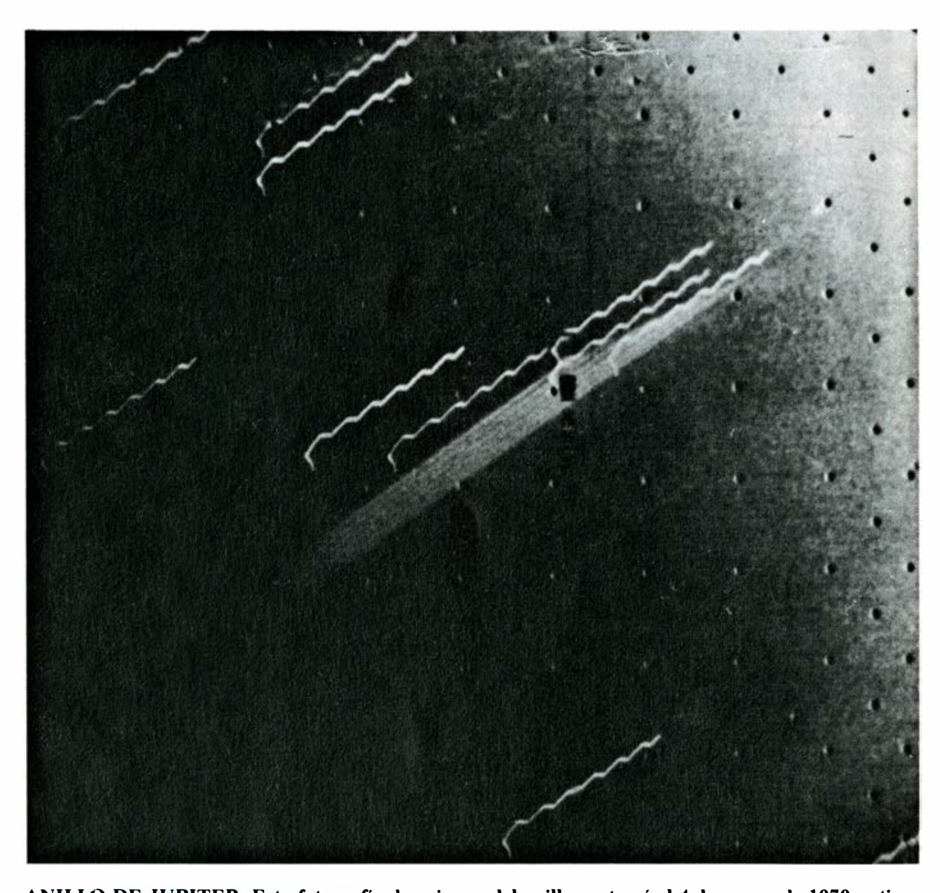
Hemos dejado el asunto del origen de los anillos para el final, debido a la dificultad de responder a esta pregunta de una forma definitiva. Hay tres posibles teorías sobre el particular, ninguna de las cuales resulta completamente satisfactoria, si bien cada una posee aspectos atractivos.

En la primera teoría, desarrollada inicialmente por Roche en 1847, se considera la posibilidad de que un satélite algo alejado de un planeta haya evolucionado lentamente hasta quedar muy cerca de éste, en la posición actual de los anillos. A esa distancia comienzan a intervenir fuerzas disruptivas estudiadas por Roche, que tratarán de romper literalmente cualquier objeto grande que se encuentre en esa región. Las fuerzas disruptivas de las que habló Roche tienen

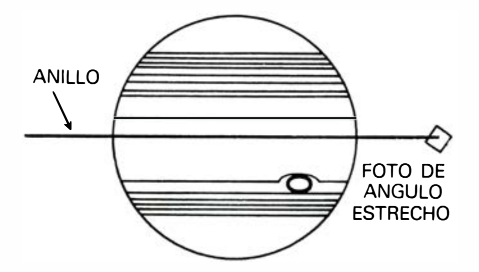


Anillo	ε	δ		η	β	α	4	5	6
Distancia [kms]	51.300	48.420	47.750	47.320	45.800	44.840	42.660	42.360	41.980
Ancho [kms]	~40 a 100	10	10	~5	10	10	10	10	~5

ANILLOS DE URANO. Las líneas de trazos indican el paso de diferentes estrellas detrás de los anillos, vistas desde diversos observatorios. Los anillos están indicados por líneas punteadas, que en realidad son unas 20 veces más gruesas de lo que deberían ser, para que la escala fuese correcta. Esto es, los anillos deberían estar representados por líneas de 0,01 milímetros de espesor, lo que no es posible en el dibujo. Cuando la estrella pasa detrás del planeta en los puntos *A* y *B*, desaparece; ello sirve para determinar el radio preciso de éste. La tabla da la distancia de los anillos y su ancho.



ANILLO DE JUPITER. Esta fotografía, la primera del anillo, se tomó el 4 de marzo de 1979, y tiene una exposición de 11 minutos, 12 segundos. En este intervalo, el anillo fue expuesto por seis veces, produciendo la banda ancha y difusa del centro de la foto. Las líneas ondulantes son imágenes de estrellas que dejaron un trazo en el cielo debido al movimiento del navío espacial. Los puntos negros que cubren toda la fotografía son marcas de calibración. Las pequeñas líneas negras horizontales del centro se produjeron por pérdida de la debida información al recibirse ésta en la estación de rastreo.



POSICION RELATIVA DEL PLANETA y de la foto anterior. El borde del anillo se encontraba a 1.212.000 kilómetros de la nave espacial y a unos 57.000 kilómetros de la capa de nubes del planeta. El espesor máximo que se puede determinar de la foto anterior es de 30 kilómetros.

su origen en el planeta, y actúan debido a la cercanía del satélite a éste. El resultado final es que no es posible que el satélite se mantenga en forma sólida. Debe romperse en muchos pedazos y dar origen así a anillos.

En la segunda teoría, llamada de la "condensación", una cantidad substancial de material se condensó desde una fase gaseosa a una sólida, para dar origen a un satélite. Pero las fuerzas disruptivas de las que hablamos antes entraron en juego, y evitaron la formación del satélite. Sólo pudieron formarse partículas pequeñas, que actualmente componen el anillo. Este modelo ha sido estudiado por diversos investigadores, y más recientemente por J. B. Pollack y sus colaboradores. Parece ser el más fundamentado.

Por último, la teoría del "impacto" sugiere que en un principio había uno o dos satélites en la situación actual de los anillos y que éstos fueron lentamente pulverizados por el efecto de los meteoritos y las colisiones subsecuentes entre los fragmentos. Esta posibilidad es la menos probable de las tres.

La situación del origen de los anillos se complica por el hecho de que muy probablemente no estamos observando la distribución original del material en éstos debido a que los efectos evolutivos no son despreciables. Esa distribución original se desconoce. El problema consiste en distinguir observacionalmente entre estas teorías, cosa que no se ha logrado hasta ahora. Desde su descubrimiento en 1610, los anillos de Saturno han ejercido una gran fascinación sobre astrónomos y artistas por igual. Con el descubrimiento de anillos alrededor de Urano y Júpiter parece que este fenómeno es más común de lo que se pensaba. Es posible que la formación de anillos sea un proceso necesario en la formación de un gran planeta. Pero estamos aún lejos de comprender cómo esto sucede en forma general.

La percepción del crecimiento humano

¿Cómo cambia la forma de la cabeza desde la niñez hasta el estado adulto? Las pruebas sobre cómo la mayoría de la gente percibe el proceso demuestran que el crecimiento puede representarse mediante un tipo de transformación geométrica

James T. Todd, Leonard S. Mark, Robert E. Shaw y John B. Pittenger

El cuerpo humano, como cualquier otro organismo en crecimiento, cambia espectacularmente de forma en el transcurso de su desarrollo, desde la infancia hasta el estado adulto. Todo el mundo tiene una noción intuitiva de los cambios morfológicos implicados en el crecimiento humano. Es fácil distinguir entre maduración normal y otros tipos de cambio biológico, tales como una ganancia de peso o una enfermedad desfigurativa, aunque la capacidad de percibir estos cambios como acontecimientos distintos nunca se ha explicado adecuadamente.

Con el fin de comprender mejor cómo percibe la gente el fenómeno del crecimiento es necesario en primer lugar describir el fenómeno en términos rigurosos. Un planteamiento sería considerar un objeto en crecimiento como un conjunto de puntos. Si el análisis se limita a dos dimensiones, la posición de cualquier punto puede determinarse por los valores de dos coordenadas, a menudo designadas por los nombres de las variables x e y. El concepto de transformación geométrica sirve para describir cómo las coordenadas de un conjunto de puntos pueden ser sistemáticamente alteradas por el crecimiento o por algún otro proceso. Una transformación se designaría introduciendo dos nuevas variables, x' e y', como relaciones en función de x e y.

Importa advertir que cualquier sistema de ecuaciones que relacione x e y con x' e y' puede interpretarse de dos maneras. En un sentido estas ecuaciones representan un cambio en el sistema de coordenadas original, tal como se observa comúnmente cuando los datos se transforman de coordenadas rectangulares en coordenadas polares [*véase la ilustración de la página 94*]. En otro sentido, no obstante, las ecuaciones representan el cambio de un objeto dentro de un sistema coordenado fijo. Esta última interpretación puede demostrarse fácilmente considerando las diferentes maneras en que un objeto cuadrado puede transformarse [*véase la ilustración de la página 95*]. Por ejemplo, una de las formas más simples de transformar un cuadrado es rotarlo. La transformación rotacional cambia las coordenadas de todos los puntos del objeto rotado; aunque cada punto resulta desplazado, hay propiedades más abstractas del objeto, como su forma general o la distancia entre cada pareja de vértices, que no resultan afectadas por la rotación. En el lenguaje de la matemática se dice que estas propiedades permanecen invariantes.

Una transformación geométrica puede percibirse a menudo como un determinado tipo de cambio, independiente de los objetos particulares a los que se aplica. El fenómeno abstracto de la rotación puede reconocerse fácilmente cuando se aplica a un triángulo, a un cuadrado o incluso a un objeto que nunca se haya visto antes. Una razón viable para distinguir entre transformaciones consiste en comparar las diferentes propiedades que dejan invariantes. Por ejemplo, es fácil ver que una transformación rígida como la rotación conserva los ángulos y las distancias entre los puntos de un objeto. Por el mismo motivo, una transformación conforme conserva las coordenadas angulares de todos los puntos en un sistema coordenado polar, una transformación afín conserva las líneas paralelas y una transformación reflexiva conserva la simetría bilateral respecto a un eje determinado.

Uno de los primeros en reconocer que el concepto de transformación geométrica podría ser útil para describir los cambios morfológicos, fue el célebre naturalista escocés D'Arcy Wentworth Thompson. En su obra, ya clásica, *On Growth and Form*, publicada por primera vez en 1917, sostuvo que tanto la progresión filogenética de una especie a otra como la progresión ontogénica de niño a adulto son procesos que afectan al organismo entero, y no una sucesión de alteraciones menores de partes individuales del cuerpo. La principal prueba en que basó esta afirmación fue su capacidad para representar cambios morfológicos aparentemente complejos como la distorsión geométrica de una rejilla colocada sobre un organismo en evolución o desarrollo. Thompson afirmaba, asimismo, que estas distorsiones geométricas solían ser resultado de fuerzas físicas del entorno de un animal, cuyos efectos podían a menudo describirse mediante una sola transformación matemática.

Los dibujos de Thompson son especialmente instructivos porque ilustran la naturaleza fundamentalmente abstracta del cambio biológico y la capacidad de diferentes observadores de percibir el cambio. Su acierto estribó en suponer que los procesos, presumiblemente complejos, del crecimiento y evolución podrían representarse bien de forma igualmente sencilla con un objeto simple tal como una rejilla cuadrada lo mismo que con un objeto complejo como la cabeza humana. Thompson no dio explicación física ni biológica para el fenómeno que estaba modelando. En la mayoría de los casos ni intentó describir el fenómeno con ecuaciones matemáticas. El valor de su planteamiento radica, sobre todo, en el dominio de la percepción visual. Los dibujos de Thompson hacían posible "ver" cómo operaban las diferentes transformaciones, aunque no analizara formalmente sus efectos con ningún grado de precisión.

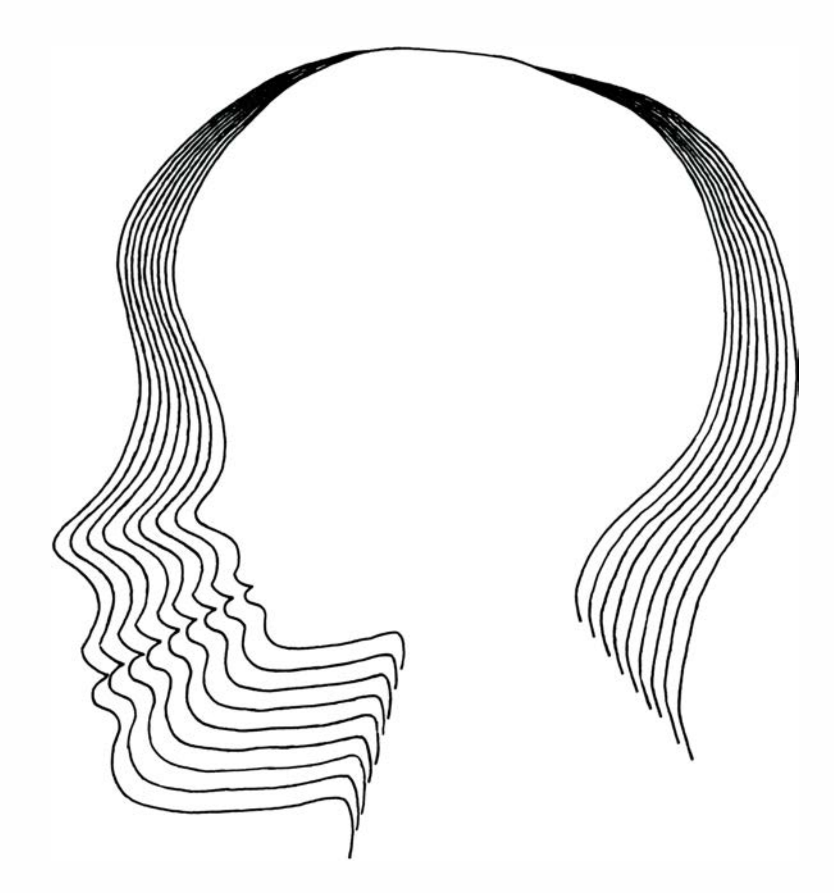
Aunque los métodos de Thompson podrían criticarse por su subjetividad inherente, vale la pena notar que, en casi

todos los intentos realizados para estudiar la morfología, tanto de formas vivientes como inertes, parece estar presente una dependencia de la percepción. En biología, por ejemplo, el sistema taxonómico de clasificación depende de que los observadores humanos sean capaces de ponerse de acuerdo acerca de las diversas similitudes y diferencias entre las características morfológicas de distintos organismos biológicos. Nuestra propia investigación sobre el crecimiento de la cabeza humana es consecuente con esta tradición. La metodología básica consiste en seleccionar transformaciones geométricas que puedan describir potencialmente el fenómeno del crecimiento, evaluando luego cada transformación prospectiva por la forma en que se percibe.

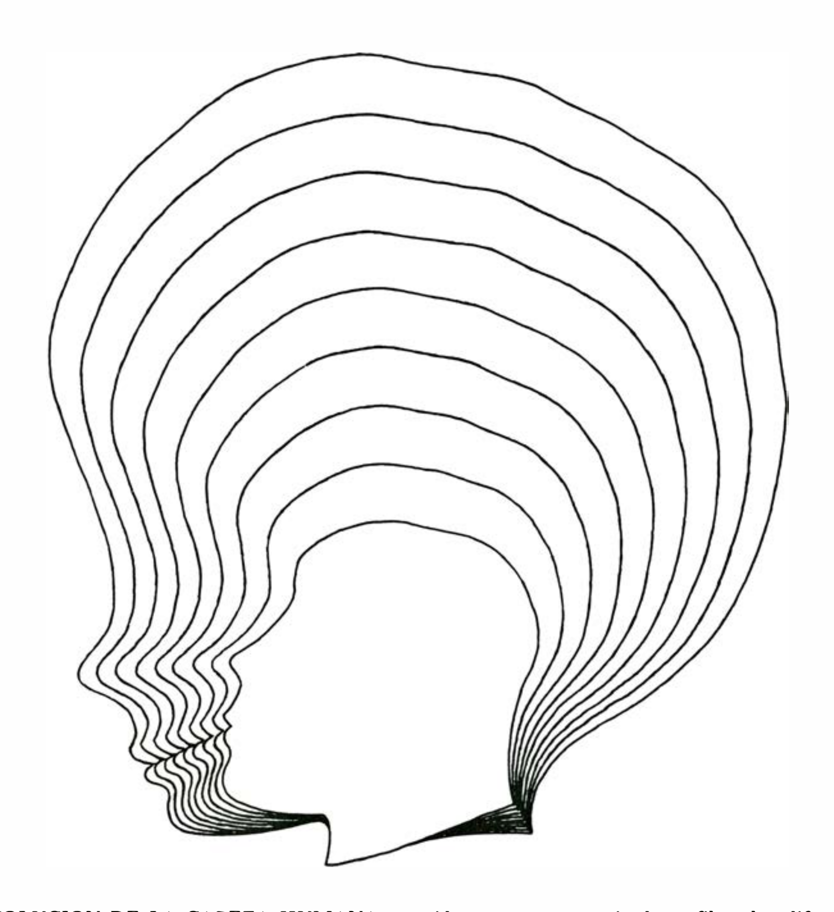
Nuestro interés por el problema se remonta a 1972, cuando dos de nosotros (Shaw y Pittenger), entonces en la Universidad de Minnesota, empezamos a investigar los cambios en la morfología craneofacial que proporcionaban información para la percepción de la edad. Otros investigadores habían notado ya que la cabeza de un recién nacido tenía un cráneo exagerado y una cara diminuta, pero que durante el desarrollo la cara crecía más rápidamente que el cráneo, dando como resultado un cambio del ángulo facial. Queríamos demostrar que podían producirse efectos similares mediante una sola transformación geométrica, y que esta transformación se percibiría como crecimiento cuando fuera aplicada a los perfiles craneofaciales humanos, en ausencia de todos los demás cambios.

La serie inicial de experimentos estudió dos transformaciones: la deformación cardioidal y el cizallamiento afín, ambas capaces de producir los cambios del ángulo craneofacial que normalmente son característicos del crecimiento craneofacial. La transformación por deformación cardioidal se llama así porque transforma un círculo en la forma acorazonada denominada cardioide. La transformación por cizallamiento afín, en cambio, transforma un círculo en una elipse orientada diagonalmente; forma parte de una clase más general de transformaciones afines cuya invariante común es que conservan las líneas paralelas.

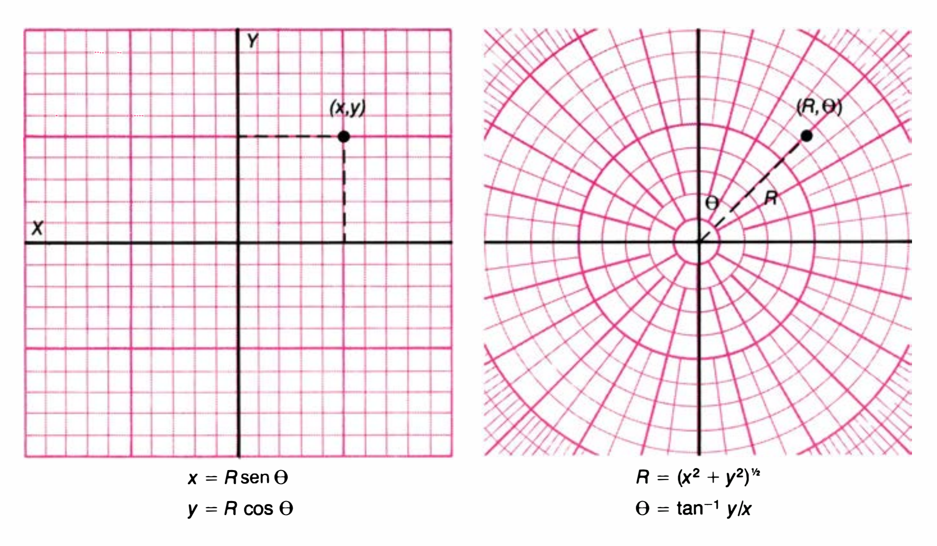
Se planeó una tarea de "apreciación de la edad relativa" para evaluar la efectividad de estas transformaciones prospectivas del crecimiento. Se presentó el perfil de una cabeza humana a los observadores y se les pidió que asignaran al perfil un número arbitrario, digamos 100. Luego se les mostraron otros perfi-



CRECIMIENTO DE UNA CABEZA HUMANA, simulado en esta secuencia de perfiles generados por ordenador. Los perfiles se obtuvieron mediante un proceso geométrico: transformación por deformación cardioidal modificada. La secuencia va de la infancia (*interno*) al estado adulto (*externo*).



EVOLUCION DE LA CABEZA HUMANA sugerida por una secuencia de perfiles algo diferente, generada por una variante de la transformación por deformación cardioidal modificada. La secuencia va desde un hombre de Neanderthal (*perfil interno*) a un ser futurista (*perfil externo*). Las dos secuencias se dibujaron mediante la ayuda de un ordenador en la Universidad americana de Connecticut.



TRANSFORMACIONES GEOMETRICAS para convertir datos de un sistema de coordenadas rectangulares (*izquierda*) a otro polar (*derecha*), y viceversa, dadas por pares de ecuaciones (*abajo*).

les que habían sido alterados sistemáticamente en diversos grados mediante las transformaciones por deformación cardioidal y cizallamiento afín [*véase la ilustración de la página 98*]. Se dijo a los observadores que valoraran la edad de cada perfil con respecto al primero. De manera que si un observador asignó 100 al primer perfil y percibía que un siguiente perfil era dos veces mayor que el primero, le asignaba el número 200.

Los resultados mostraron que la transformación por deformación cardioidal producía grandes cambios en la edad percibida de los perfiles faciales y que la transformación por cizallamiento afín producía poco cambio. Los distintos efectos sobre la percepción de estas transformaciones sugiere convincentemente que la información necesaria para especificar el crecimiento es inherentemente abstracta. Al examinar los perfiles resulta difícil aislar una dimensión específica en la cual difieran las dos transformaciones. Ambas afectan el ángulo facial y la forma global de la cabeza, pero los cambios producidos por la deformación cardioidal se parecen al crecimiento o la evolución, mientras que el cizallamiento afín no produce más que una distorsión inidentificable. Debe tenerse en cuenta, asimismo, que la transformación por deformación cardioidal se percibe como crecimiento, aunque los perfiles estímulo carezcan de todos los detalles internos normalmente asociados con las caras humanas. Esta observación aporta cierto fundamento a la afirmación de que la percepción del crecimiento no necesita depender de ningún conjunto determinado de propiedades del objeto.

Desde entonces hemos llevado a cabo una serie complementaria de experimentos que demuestran este último punto con mayor claridad. Recurrimos al mismo procedimiento de antes para hacer las apreciaciones de la edad relativa, pero esta vez no utilizamos perfiles faciales humanos como estímulos. En un experimento se presentaron a los observadores dibujos de perfiles de pájaros, perros y monos que habían sido sistemáticamente transformados con diversas intensidades de deformación cardioidal y cizallamiento afín. Como en el primer experimento con perfiles faciales humanos, los resultados mostraron con toda nitidez que la transformación por deformación cardioidal se percibía como crecimiento, mientras que la transformación por cizallamiento afín tenía de nuevo poco efecto sobre la edad percibida.

Los resultados de un segundo experimento fueron aún más reveladores. Se presentaron a los observadores dibujos transformados de vistas frontales y laterales de "escarabajos" Volkswagen, ambas con y sin características faciales dibujadas para que recordaran los rostros con más verosimilitud. La transformación por deformación cardioidal produjo grandes cambios en la edad percibida de todos estos estímulos, a pesar de que los Volkswagen no crecen. La transformación por cizallamiento afín apenas produjo cambios. Estos resultados sugieren que los observadores respondían al crecimiento como un tipo de cambio abstracto, de forma muy semejante a la rotación, fácilmente reconocible sin que importen los objetos a los que se aplica.

En una serie de experimentos más recientes realizados en la Universidad de Connecticut, nos propusimos determinar si los efectos de la deformación cardioidal son perceptivamente equivalentes a los cambios morfológicos producidos normalmente por el crecimiento real de la cabeza humana y si otras transformaciones no examinadas con anterioridad podían ser percibidas de forma similar. Nuestros estímulos consistían en muchas secuencias diferentes de cinco perfiles faciales, cada una ordenada de izquierda a derecha en una sola página [*véase la ilustración de la página 100*]. Se instruyó a los observadores para que valoraran cada secuencia de 0 a 4 sobre la base de su parecido con el crecimiento real, e indicaran la dirección en la que parecía darse el crecimiento. Las secuencias se diseñaron de modo que la edad percibida de los diferentes perfiles aumentara secuencialmente de izquierda a derecha. No obstante, para las secuencias que generalmente producían valoraciones bajas, hubo unos pocos ejemplos en que los sujetos informaron que la dirección del crecimiento parecía darse en el sentido opuesto. Cuando esto ocurría, la valoración se interpretaba como un número negativo.

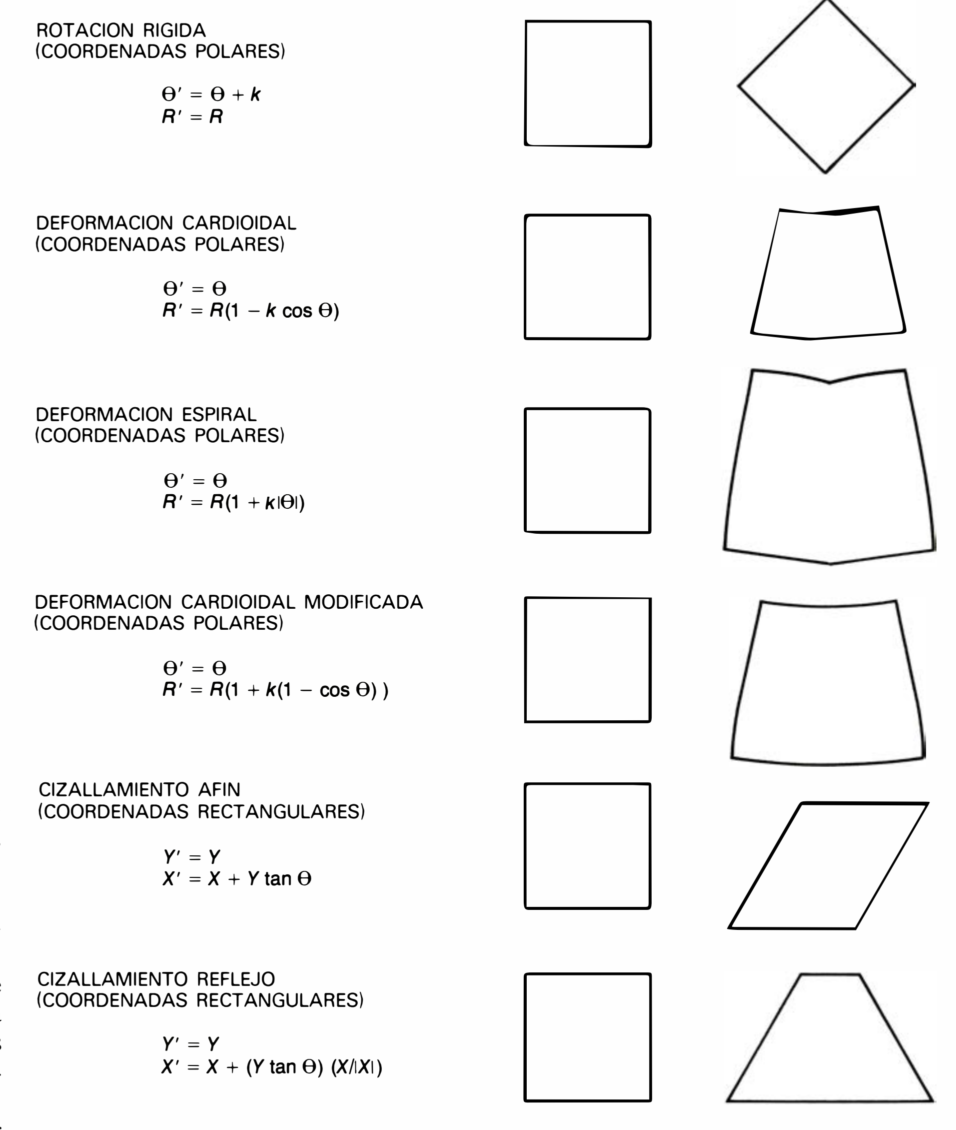
Las secuencias de estímulo se prepararon a partir de una selección de registros de crecimiento a largo plazo, recogidos en un comienzo por el Child Research Council de Denver, Colorado, como parte de un estudio que duró de 1925 a 1970. Un grupo de estímulos, las secuencias de crecimiento reales, proporcionaron una medida de partida conveniente para evaluar distintas transformaciones. Cada secuencia real de crecimiento consistía en perfiles faciales de un solo individuo en cinco edades diferentes. Estos perfiles se calcaron directamente de placas radiográficas obtenidas con bajas cantidades de radiación, de modo que el perfil de la piel resultaba claramente visible. El cambio global del ángulo facial entre el perfil más joven y el de más edad se utilizó como índice de la cantidad de deformación resultante del crecimiento real. Un segundo grupo de estímulos, llamados secuencias de transformación, fueron calculados matemáticamente con un ordenador digital transformando de una manera sistemática el perfil más joven de cada secuencia de crecimiento real. Se seleccionaron los valores específicos de la deformación cardioidal, deformación espiral, cizallamiento afín, cizallamiento reflejo y rotación para cada individuo, de modo que el cambio global del ángulo facial fuera idéntico al cambio que había sufrido el individuo en virtud de los procesos normales del crecimiento. Había asimismo un grupo de secuencias de control en las que los cinco perfiles eran idénticos. Esto constituía un punto de partida adicional de medida para valorar las transformaciones que no se parecían al crecimiento.

El experimento se llevó a cabo con 40 sujetos. Como podía esperarse, las valoraciones medias más altas fueron dadas por las secuencias de crecimiento real. Las valoraciones resultaron ligeramente inferiores para la deformación cardioidal y más bajas aún para la deformación espiral. Ninguna de las transformaciones restantes produjo valoraciones significativamente mayores que las de las secuencias de control.

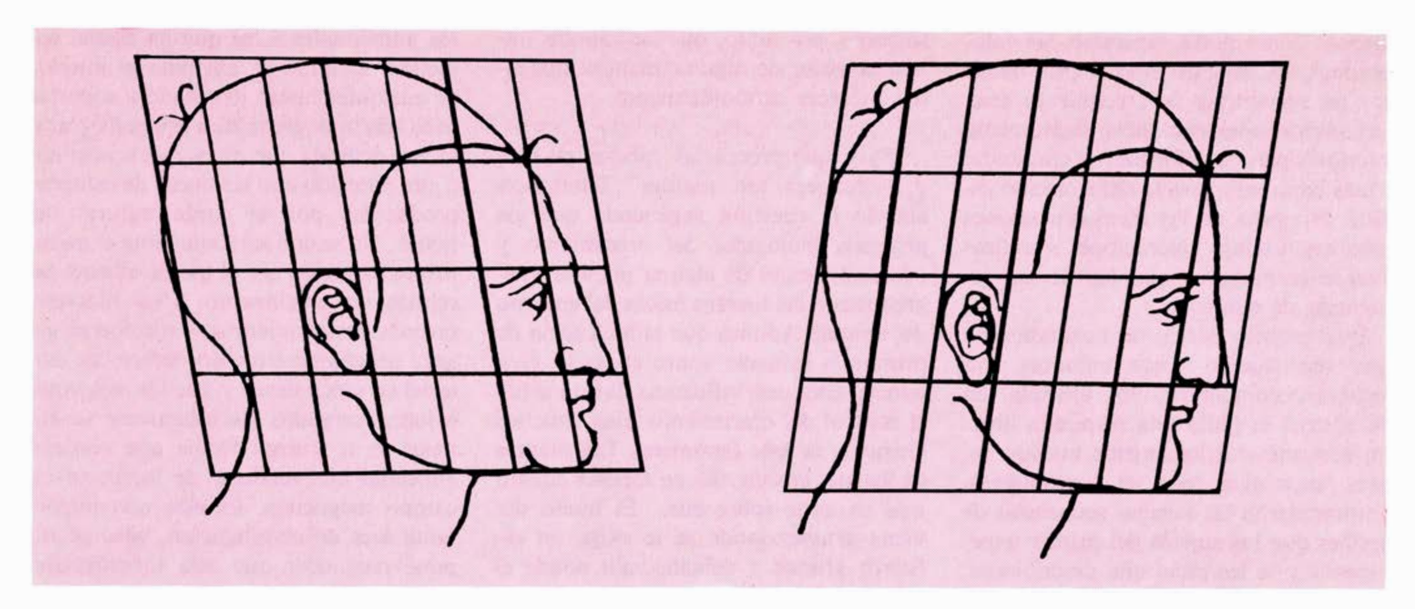
Este modelo básico de resultados ha sido reproducido desde entonces con otros procedimientos. Por ejemplo, en un ensayo se pidió una respuesta libre, sin comunicar a los sujetos nuestro interés específico por el crecimiento. Contemplaron las mismas secuencias de perfiles que los sujetos del primer experimento y se les pidió que describieran, si ello era posible, cómo había podido darse cada modelo de cambio en un entorno natural. Como esperábamos, hubo una alta incidencia de respuestas relacionadas con el crecimiento para las secuencias de la deformación cardioidal, la deformación espiral y el crecimiento real y apenas hubo respuestas relacionadas con el crecimiento para el cizallamiento afín, el cizallamiento reflejo, la rotación y para las secuencias sin cambio. Estos hallazgos parecen ser generales. El mismo modelo básico de resultados se ha observado en más del 85 por ciento de los sujetos que han participado en estos experimentos o en otros relacionados con ellos

Partiendo de estos resultados, se nos permite concluir que la percepción del crecimiento es sorprendentemente selectiva. De las cinco transformaciones examinadas, sólo la deformación cardioidal y la deformación espiral son contestadas de un modo coherente como crecimiento. Estas transformaciones tienen, desde el punto de vista matemático, mucho en común. Ambas conservan la coordenada angular de todos los puntos en un sistema de coordenadas polares y ambas producen una cúspide, o una muesca, en la cima del objeto que se transforma. La coherencia interna de las respuestas de los sujetos en estos experimentos y el hecho de que la deformación cardioidal se perciba como crecimiento casi tan fácilmente como el propio crecimiento, va muy a favor de que este tipo particular de cambio sea una justa aproximación a los efectos globales de la maduración en varias de las situaciones que ocurren de forma natural. Despueś de todo, sería difícil imaginar que los observadores respondieran selectivamente a una determinada transformación como crecimiento si esa transformación no guardara relación con el acontecimiento real observado en su experiencia cotidiana. Nuestros resultados sugieren, por tanto, que las cabezas humanas están de alguna manera obligadas a crecer cardioidalmente.

¿Por qué crecen las cabezas de esta manera tan regular? Thompson abordó la cuestión sugiriendo que los procesos biológicos del crecimiento y evolución están de alguna manera integrados con las fuerzas físicas del entorno del animal. Apuntó que la aplicación de presión o esfuerzo sobre el tejido vivo parece tener una influencia directa sobre el control del crecimiento. Hay muchos ejemplos de este fenómeno. Las plantas de los pies crecen más en espesor cuanto más se anda sobre ellas. El hueso deviene grueso donde se le exige un esfuerzo grande y delgado, allí donde el esfuerzo es bajo. Hasta la propia estructura interna de un hueso refleja las fuerzas ambientales a las que ha estado sometido. Cuando se examina el interior de cualquier hueso destinado a soportar peso hay una estructura enrejada claramente definida que muestra un sorprendente parecido con las líneas de esfuerzo producidas por la carga natural del hueso. No se conoce totalmente el mecanismo biológico por el que se alinean las células en crecimiento. Una hipótesis prometedora sostiene que el esfuerzo genera un campo eléctrico dentro del material en crecimiento y que las moléculas e iones cargados eléctricamente se alinean de la misma forma que resultan alineadas las limaduras de hierro en un campo magnético. Es esta una importante área de investigación, pero se impone reconocer que esta investigación nunca podrá explicar por qué el creci-



LA FORMA DE UN OBJETO puede alterarse dentro de un sistema de coordenadas fijo aplicando diversas transformaciones geométricas, seis de las cuales se registran por su nombre y también se representan en forma de ecuaciones en el lado izquierdo. (El sistema de coordenadas fijo se da entre paréntesis en cada caso.) Los efectos de las distintas transformaciones sobre un objeto cuadrado aparecen a la derecha. Una transformación conforme, como la deformación espiral o los dos tipos de deformación cardioidal representados, tiene la propiedad especial de conservar la coordenada angular de todos los puntos en un sistema de coordenadas polares. (Las ilustraciones son de Jerome Kuhl.)

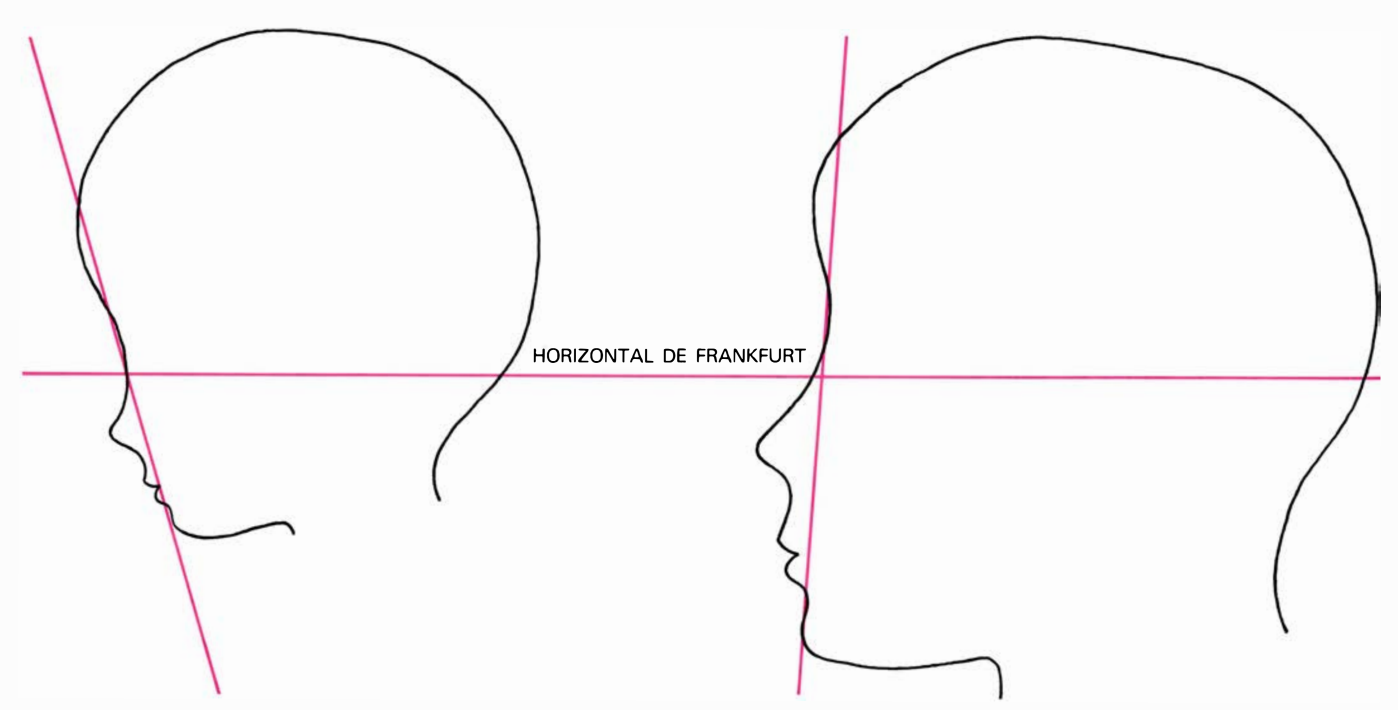


PRIMER INTENTO de aplicar el concepto de transformación geométrica a la descripción del cambio morfológico. Se debe al naturalista escocés D'Arcy Wentworth Thompson, quien logró representar todo tipo de cambios morfológicos aparentemente complejos en función de la distorsión geométrica de una rejilla colocada sobre un organismo en evolución o crecimiento. En esta ilustración de la técnica básica, tomada de su libro *On Growth and Form*, que apareció publicado por primera vez en 1917, Thompson superpuso un par de rejillas cuadradas, distorsionadas por diferentes grados de cizallamiento afín, sobre dos dibujos de cabezas humanas que copió de la edición de 1613 del *Tratado sobre las proporciones* de Durero.

miento es cardioidal. Aun cuando se conociera con todo detalle cómo responden las células al esfuerzo, no podrían predecirse cambios en la morfología, a no ser que se comprendieran también las pautas de esfuerzo a las que está sometido el material en crecimiento.

Siguiendo esta línea de argumentación, parece razonable especular que si las cabezas crecen cardioidalmente, entonces las pautas de esfuerzo a las que están sometidas las cabezas también deben ser cardioidales. Con el fin de comprobar esta hipótesis, consideramos el complejo craneofacial como un tanque esférico lleno de líquido. Por hidrostática sabíamos que la presión en cualquier punto de la superficie del tanque estaba directamente determinada por la cantidad de líquido que tenía encima. Esta presión puede expresarse en función de la posición a través de una ecuación que relaciona la presión con el radio de una esfera multiplicado por una constante [que representa el producto de la fuerza de gravedad por la densidad del líquido]. Si la estructura de la cabeza se remodela de acuerdo con este gradiente de presión, se obtiene una nueva transformación.

De hecho, la nueva transformación es sorprendentemente similar a la transformación por deformación cardioidal concebida en un principio por dos de nosotros (Shaw y Pittenger). Por esta razón se la denominó deformación cardioidal modificada. Ambos tipos de cambio conservan la coordenada angular de todos los puntos en un sistema de coor-



EL ANGULO FACIAL cambia durante el crecimiento. En el trabajo del autor, el ángulo facial se define por la intersección de dos líneas. Una línea, la horizontal de Frankfurt, pasa por la parte superior del orificio auditivo y por la parte inferior de la órbita. La otra une la zona más prominente de la barbilla con la región más profunda de la depresión, justo por encima de la nariz. El perfil de la izquierda es de un niño; el de la derecha, de un adulto.

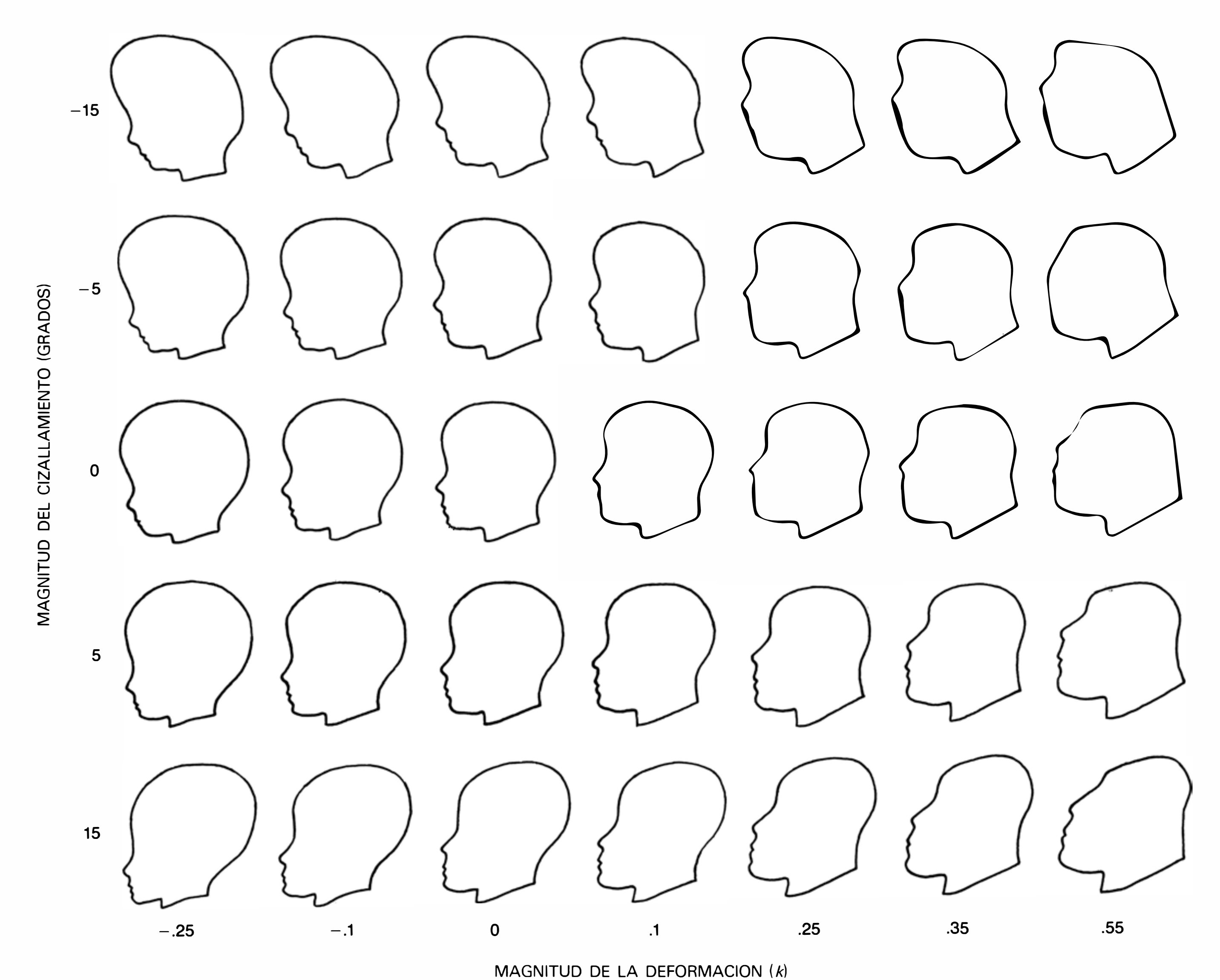
denadas polares y ambos transformarán un círculo en un cardioide. La principal diferencia entre ellos radica en que la transformación por deformación cardioidal modificada afecta al tamaño de un objeto de un modo más acorde con los efectos del crecimiento real.

El análisis sugerido antes está, por supuesto, muy simplificado. Las cabezas no son perfectamente esféricas y hay otras fuentes de esfuerzo que operan sobre el complejo craneofacial además de la fuerza de la gravedad. El modelo resultante puede imaginarse como una especie de caso ideal, similar al análisis de la caída de un cuerpo sin considerar la resistencia del aire. Un modelo de este tipo puede ser bastante útil si ayuda a comprender las influencias globales sobre el crecimiento craneofacial o si proporciona un medio de aproximación al curso del crecimiento en cualquier individuo dado.

Esto nos remite nuevamente a la cuestión de qué relación hay entre crecimiento y percepción del crecimiento. Hemos demostrado ya que la transformación por deformación cardioidal es un modelo de crecimiento perceptivamente preciso, pero ¿es lo suficiente preciso para satisfacer las necesidades de un clínico, por ejemplo, a la hora de establecer un tratamiento correctivo a pacientes con anomalías faciales? Recientemente hemos iniciado experimentos diseñados con el propósito específico de dar respuesta a ese interrogante.

Nuestro procedimiento es bastante simple. Trabajando con la misma serie de radiografías longitudinales de cráneo que utilizamos en nuestros primeros experimentos de percepción, calcamos el perfil de un cráneo de niño e intentamos predecir qué forma tendrá el cráneo al alcanzar la madurez. Comparamos luego nuestra predicción con una imagen radiológica del mismo individuo practicada en estado adulto.

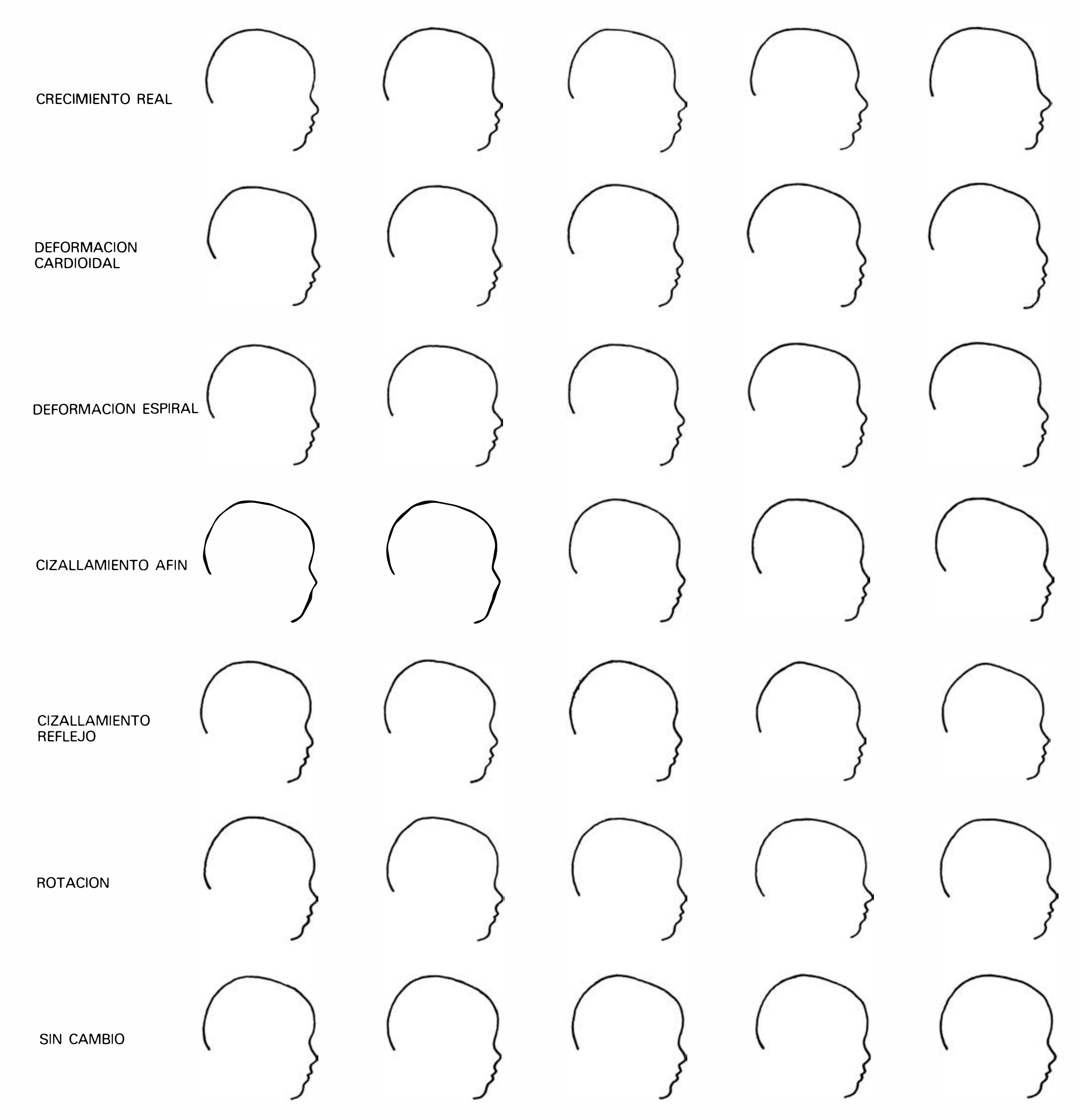
Un problema fundamental que debía plantearse antes de que pudiéramos hacer predicciones seguras, era que nuestro modelo no sugería con precisión cómo orientar una cabeza antes de aplicar una transformación. Aunque nuestras primeras investigaciones indicaron que la transformación por deformación cardioidal se percibía como crecimiento en una gama considerable de orientaciones faciales, había un efecto de orientación considerablemente importante cuando las caras se comparaban punto a punto. Era, pues, necesario disponer de un procedimiento específico para orientar una cabeza de modo que diferentes investigadores pudieran hacer las mis-



DIVERSOS PERFILES de una cabeza humana se produjeron aplicando varias combinaciones de cizallamiento afín y deformación cardioidal al perfil de un chico de 10 años. En un primer experimento acometido por dos de los autores (Shaw y Pittenger) en la Universidad de Minnesota, se pidió a los observadores que juzgaran la edad relativa de cada uno de los perfiles transformados con respecto al original no transformado (que aparece aquí en la posición en que tanto el cizallamiento como la deformación son iguales a cero). Los resultados demostraron que la transformación por deformación cardioidal explicaba cambios mucho mayores en la edad percibida de los perfiles craneofaciales que la transformación por cizallamiento afín.

mas predicciones en ocasiones distintas. Nuestra solución a este problema, conseguida por tanteo, consistió en orientar cada imagen de rayos X sobre una hoja de papel de representación polar. Podemos conseguir predicciones satisfactorias colocando el extremo del mentón a 160 grados, y colocando a 125 grados el punto donde el hueso de la base de los orificios nasales se encuentra con el resto del cráneo, de modo que el origen del papel de representación esté a medio camino entre los dos puntos donde el cráneo corta al eje horizontal.

Se orienta correctamente una radiografía. Se genera luego una serie continua de perfiles craneales transformados mediante valores sucesivamente mayores de la transformación por deformación cardioidal modificada. La familia de formas resultante constituye una trayectoria predicha del crecimiento craneofacial. Según nuestro modelo, un individuo podría crecer a ritmos variables en diferentes momentos, pero, salvo algún trauma inesperado, la dirección del crecimiento seguiría siempre la trayectoria pronosticada. Esta hipótesis puede probarse comparando la silueta craneal predicha para cualquier individuo dado con una imagen de rayos X real tomada en la madurez. Los resultados de este método para dos sujetos típicos se presentan en la ilustración inferior de la página siguiente. Debería quedar claro, a partir de la figura, que nuestro modelo



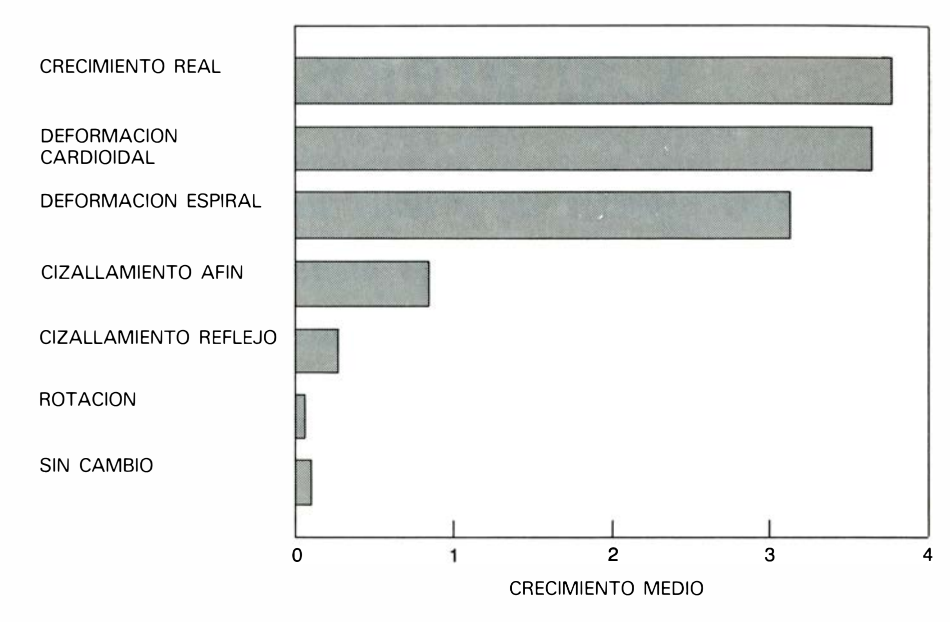
SERIES DE PRUEBAS diseñadas, recientemente, para comparar diversas transformaciones prospectivas simuladoras del crecimiento, deformación cardioidal incluida, con el crecimiento real. A este propósito los autores utilizaron como estímulos muchas secuencias diferentes de perfiles faciales, ordenando cada secuencia de izquierda a derecha en una misma página. Se pidió a cuarenta observadores que valoraran cada secuencia de 0 a 4 en razón del parecido con el crecimiento real y que indicaran la dirección en la que el crecimiento parecía darse. Las secuencias se prepararon a partir de registros de crecimiento a largo plazo recogidos por el Child Research Council, de 1925 a 1970. La secuencia sin cambio servía de control.

cardioidal del crecimiento craneofacial es capaz de generar predicciones sorprendentemente precisas.

De esta investigación podrían resultar diversas aplicaciones clínicas importantes. A los cosmetólogos, ortodontólogos y cirujanos estomatólogos se les presenta el grave problema de sentirse incapaces de predecir cómo va a interaccionar un tratamiento médico dado con los procesos normales de crecimiento. Por esta razón, muchos individuos que padecen malformaciones craneofaciales deben a menudo esperar a la madurez para empezar un tratamiento correctivo. La capacidad de pronosticar el crecimiento puede también proporcionar a los médicos un útil instrumento para el diagnóstico de las malformaciones craneofaciales. Si una cabeza humana está normalmente obligada a crecer según una trayectoria cardioidal, las desviaciones significativas respecto a la trayectoria es probable que indiquen que los procesos normales del crecimiento de alguna manera han salido mal. Comparando el desarrollo craneofacial real de un paciente con la trayectoria cardioidal predicha, un especialista podría deducir las causas subyacentes del crecimiento anormal y podría valorar razonablemente qué aspecto hubiera tenido el paciente en condiciones de normalidad. Esta información resultaría de particular utilidad para establecer los objetivos del tratamiento correctivo.

Hay otros muchos problemas que piden resolución antes de abordar el pleno conocimiento de las regularidades globales del crecimiento craneofacial y la capacidad de percibir el crecimiento como un tipo de cambio específico. Uno de los problemas que estamos investigando actualmente es el modelo de crecimiento en otras partes del cuerpo en relación con la cabeza. El primer biólogo que se ocupó de este asunto con un planteamiento transformacional fue P. B. Medawar. En 1944 informó de una transformación geométrica que describía adecuadamente los cambios observados en las proporciones del cuerpo humano desde la infancia hasta el estado adulto. Nuestra propia investigación en este campo se ha centrado, sobre todo, en demostrar el rasgo perceptivo de la transformación de Medawar como un tipo abstracto de cambio. Hasta ahora nuestros resultados indican que la transformación de Medawar se parece a la deformación cardioidal en cuanto que se percibe como crecimiento, aun en el caso de que se aplique a los objetos no familiares.

Otro problema relacionado cuya investigación tenemos entre manos es el de la aparente similitud entre crecimiento y evolución. En el transcurso de nuestra investigación perceptiva quedamos sorprendidos al descubrir que, invirtiendo un signo en la transformación por deformación cardioidal modificada, se podría producir un modelo de cambio muy parecido a la evolución. Los observadores han advertido frecuentemente que el perfil más interno guarda cierta semejanza con un hombre de Neanderthal, mientras que el perfil más externo se parece a un ser futurista como los que pueden verse en películas de ciencia ficción. Puesto que tanto el crecimiento como la evolución pueden describirse, según se desprende, mediante una sola transformación geométrica, parece razonable especular que ambos procesos están afectados por las mismas influencias. Estas especulaciones quizás ayudarán, en último término, a desvelar por qué el cambio evolutivo se percibe como un proceso continuo que, como el crecimiento, se desplaza inexorablemente a lo largo de una trayectoria específica del cambio morfológico.



RESULTADOS DEL EXPERIMENTO ilustrado en la página anterior cartografiados en este gráfico. El valor medio de crecimiento para la transformación por deformación cardioidal era el más parecido al de la secuencia de crecimiento real, siguiéndole a poca distancia el correspondiente a la transformación por deformación espiral. Ninguna de las otras transformaciones geométricas prospectivas dio un resultado significativamente mayor que el de la secuencia control (*"Sin cambio"*). Este modelo básico de resultados, que sugieren que las cabezas crecen cardioidalmente, ha sido reproducido posteriormente.



LA TRANSFORMACION POR DEFORMACION CARDIOIDAL modificada se contrastó adaptándola a calcos de imágenes radiológicas reales tomadas de una misma persona en edades diferentes. Los perfiles coloreados de la izquierda se calcaron de radiografías de una mujer a las edades de 7 y 22 años; los perfiles coloreados de la derecha se calcaron de radiografías de un varón a las edades de 8 y 19 años. Los perfiles en negro, discontinuos, son las versiones transformadas del perfil más joven de cada persona. Los valores de la transformación por deformación cardioidal modificada se escogieron de manera que el perfil más joven transformado fuera lo más similar posible al perfil real de más edad.

Cangrejos decoradores

Muchas especies de arañas de mar pueden camuflarse empleando pautas de comportamiento mediante las que seleccionan materiales de su ambiente y los colocan formando guirnaldas sobre sus caparazones

Mary K. Wicksten

A lo largo de toda la escala animal pueden verse (o ¡no verse!) animales que se enmascaran. Algunos insectos se parecen a una ramita; determinados lagartos pueden cambiar su coloración para que se adapte a distintos fondos; algunos mamíferos son moteados, de modo que se confunden con el entorno cuando éste está constituido por luces y sombras. En el ambiente marino los cangrejos figuran entre los animales mejor camuflados. Muchas de las miles de especies de cangrejos tienen listas, manchas o dibujos que sirven para romper la silueta de su caparazón dorsal. Unas cuantas especies poseen un par de patas posteriores modificadas con las que recogen objetos, como conchas o esponjas, y los mantienen en su caparazón o sobre el mismo. Sin embargo, los cangrejos más adictos al camuflaje son los que seleccionan deliberadamente fragmentos de material de su ambiente y lo fijan a distintas partes de su caparazón. Denominados cangrejos enmascaradores o bien decoradores, estos animales pueden hallarse tan densamente incrustados con filamentos de algas rojas o pardas, fragmentos de briozoos ramificados y pubescentes, segmentos de hidroideos pardoamarillentos y plumosos y esponjas de vivos colores, que un naturalista submarino experimentado puede sentarse, con toda tranquilidad, sobre un cangrejo decorador antes de notar su presencia.

Los cangrejos pertenecen al orden de crustáceos Decápodos, y los cangrejos decoradores a la familia de decápodos Májidos (Máyidos), llamados comúnmente arañas de mar, cangrejos araña, cámbaras y centollos. Las arañas de mar tienen el cuerpo redondeado o alargado, cuatro pares de patas "marchadoras", largas y delgadas, y un par de patas anteriores, modificadas en forma de quelas o pinzas. Mediante estas quelas los cangrejos recogen fragmentos de material ornamental y los fijan a las diminutas sedas en forma de gancho, o cerdas, que se encuentran en distintas partes del caparazón del cangrejo.

Los naturalistas han sabido de la costumbre de las arañas de mar de decorar su caparazón por lo menos desde mediados del siglo XIX. En 1889, el naturalista sueco Karl Aurivillius presentó una detallada memoria de las actividades de decoración de muchas especies europeas. Sin embargo, antes de la introducción del equipo de buceo autónomo, todos estos estudios se basaban en observaciones en acuario de cangrejos que habían sido capturados mediante dragas, un procedimiento no selectivo que tiende a dañar a los animales. En estos últimos años ha sido posible no sólo llenar los acuarios de cangrejos sanos de una gran variedad de especies, tamaños y estadios de madurez, sino también observar a los animales en su hábitat natural. Con la aplicación de las técnicas modernas para la fotografía submarina y la cinematografía ultrarrápida y para la microscopía electrónica de barrido, los investigadores en este campo han descubierto nuevos aspectos del comportamiento decorador. Comentaré aquí algunos de los hallazgos más recientes sobre la forma, la función y el desarrollo de la decoración en los cangrejos araña.

En realidad, la acción de decorarse es una compleja cadena de actividades que comienza con la adquisición de un fragmento de material de ornamento. Para esta tarea la araña de mar se vale de sus ligeras quelas, que son delgadas y parecidas a pinzas en las hembras y en los machos inmaduros y más robustas en los machos maduros. Las quelas pueden actuar por separado para agarrar directamente del fondo fragmentos de algas o de otros detritos o conjuntamente para retorcer y arrancar ramitas de colonias de briozoos o hidroideos y romperlas en fragmentos de longitud adecuada. Los dedos de las quelas pueden asimismo cortar fragmentos de esponjas o de ascidias compuestas. (Las ascidias compuestas, anaranjadas o blancas, que se encuentran sobre el caparazón de muchos cangrejos decoradores, son organismos carnosos que crecen en colonias apelotonadas sobre sustratos duros.)

Una vez se ha obtenido un fragmento de material ornamental de tamaño apropiado, una de las quelas lo conduce al campo oral, es decir, la región situada cerca de la parte anterior del cangrejo, donde se hallan las piezas bucales. Las piezas bucales manipulan el fragmento de material, haciéndolo girar repetidamente hasta que sus bordes son ásperos. (Si el fragmento de material es largo y delgado, como un filamento de alga, se hace áspero únicamente por un extremo.)

Para fijar a su caparazón el fragmento de material ya manipulado, el cangrejo lo toma de sus piezas bucales con una de sus quelas y lo frota contra una zona del caparazón cubierta con sedas ganchudas. Se encuentran hileras de estas sedas curvadas (y en algunos casos barbeladas) sobre el rostro del cangrejo (que es una prominencia situada frente a los ojos), sobre el dorso de sus patas marchadoras (y en algunos casos sobre el dorso de sus quelas) y a lo largo de los lados del caparazón, aunque la distribución difiere de una especie a otra. El fragmento de material se adhiere al caparazón porque antes de que el cangrejo libere el fragmento de sus piezas bucales lo gira de manera que se halle paralelo o perpendicular a las hileras de sedas ganchudas a las que ha de fijarse. Cuando el cangrejo frota el fragmento contra las hileras de sedas con su quela, el fragmento queda enredado o atravesado por ellas.

Un fragmento de material ornamental que no quede rápidamente adherido es devuelto a las piezas bucales para una ulterior manipulación. Con frecuencia se ha indicado que las glándulas de las piezas bucales de una araña de mar



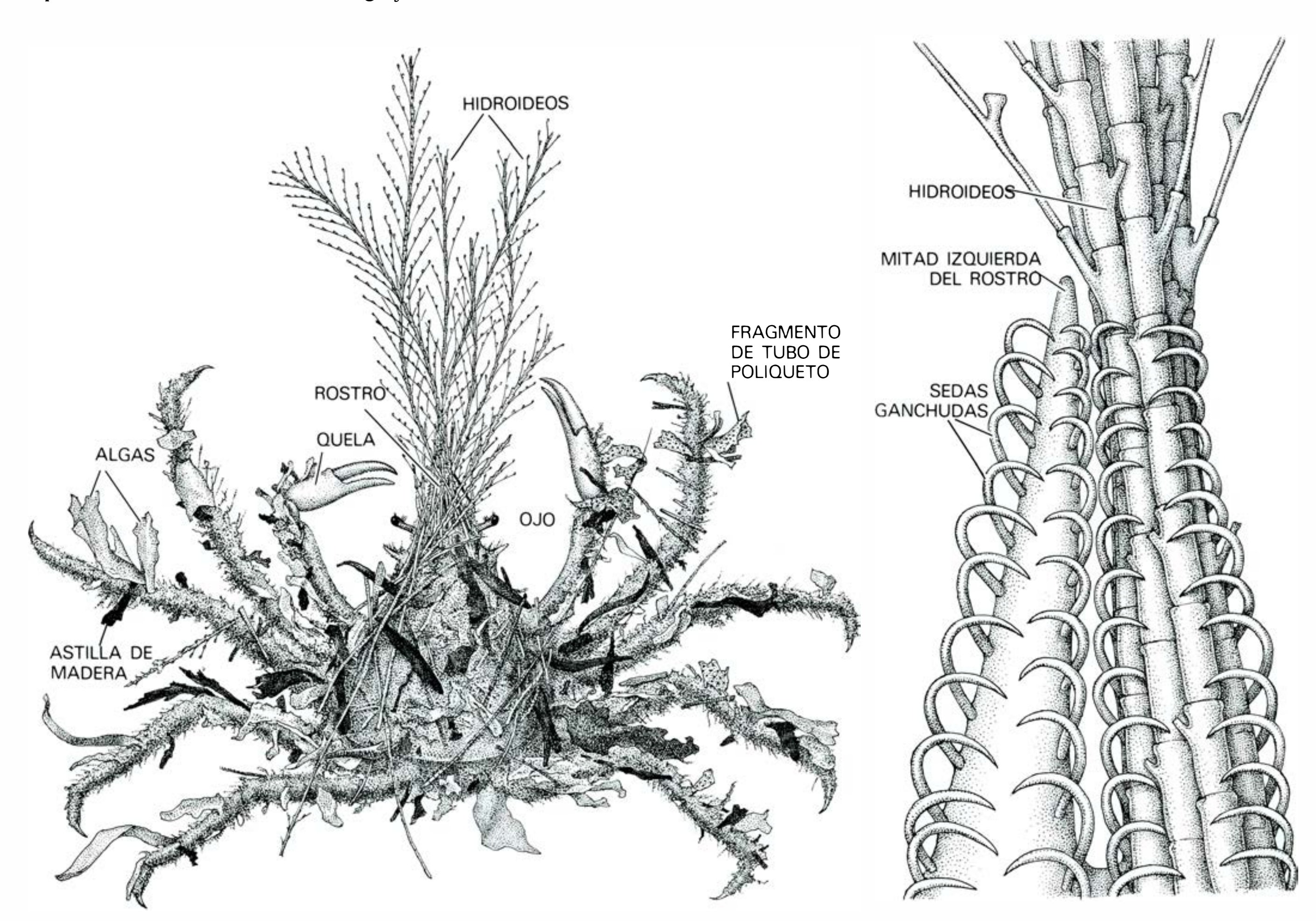
CANGREJO MUY ORNAMENTADO. Este ejemplar de *Oregonia gracilis,* recubierto por fragmentos de esponjas amarillo blancuzcas y briozoos ramificados y pubescentes, apenas puede verse en el centro de esta fotografía. Como todas las especies que se engalanan, este cangrejo pertenece a la familia Májidos, cuyos individuos se conocen familiarmente con el nombre de arañas de mar. Las arañas de mar poseen un par de quelas (patas anteriores en forma de pinzas) que en las especies que se ornamentan sirven para recoger material y fijarlo a sedas ganchudas, diminutas cerditas curvadas que se encuentran a los lados del caparazón dorsal, sobre el rostro (una protuberancia a veces bifurcada que se halla frente a los ojos), sobre el dorso de las patas marchadoras, largas y delgadas, y a veces sobre el dorso de las propias quelas. (La distribución de las sedas ganchudas varía de una especie a otra.) Durante el día las arañas de mar se posan sobre el fondo, con las quelas dobladas bajo el animal, como en el ejemplar de la fotografía.

elaboran un pegamento que se aplica mediante esta manipulación oral. No obstante, estas glándulas funcionan probablemente en la digestión y no en la ornamentación; he descubierto que un cangrejo araña puede decorarse normalmente después de haberle sido extirpadas tales glándulas. Por otra parte, si se eliminan las sedas ganchudas del cangrejo, éste no puede decorarse, aunque realiza repetidos intentos de fijar material adecuadamente preparado. (Otros tipos de sedas del caparazón del cangrejo funcionan como estructuras sensoriales táctiles y, con probabilidad, proporcionan información acerca de la posición de los materiales de ornamentación.)

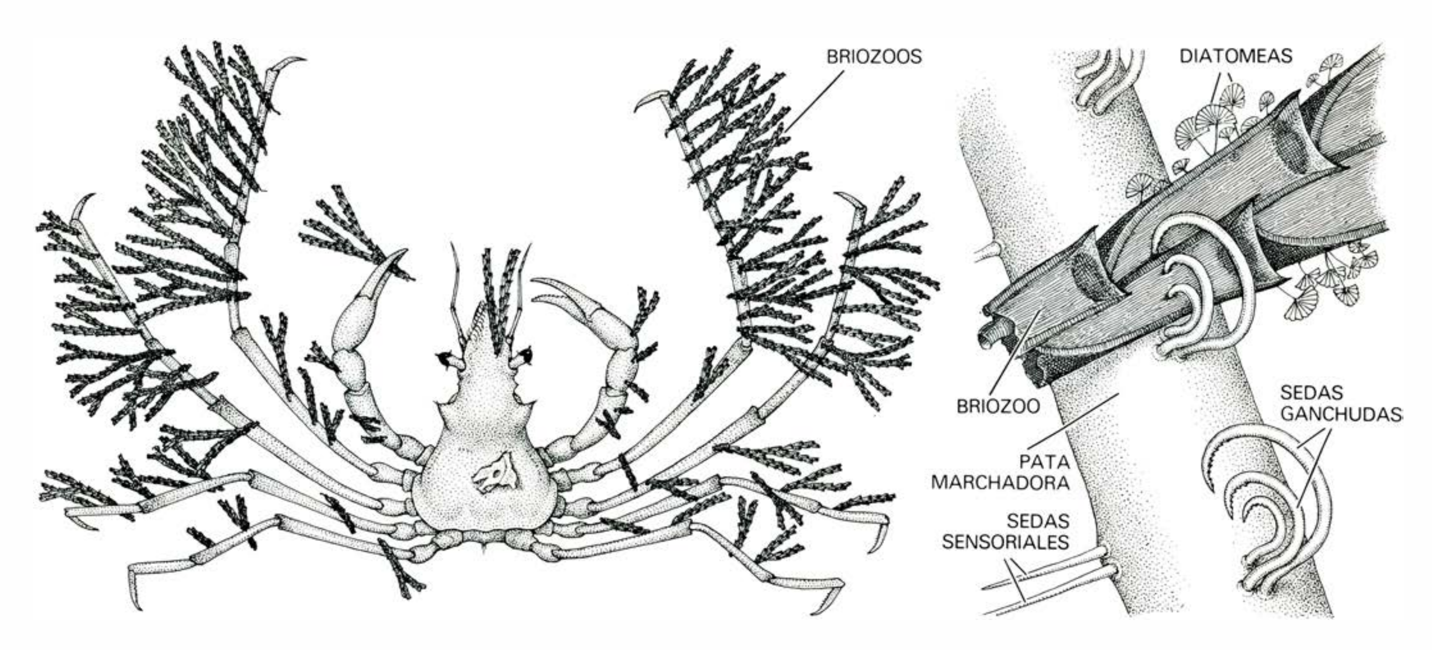
Unas cuantas especies de cangrejos araña habitan sobre fondos blandos formados por fango o arena, pero la mayoría de ellas viven sobre sustratos duros o rocosos, en cualquier lugar desde el nivel de la marea alta sobre la línea de costa hasta el borde externo de la plataforma continental. Los cangrejos se instalan en estos hábitats después de un estadio larvario durante el cual flotan libremente, junto a otros organismos del plancton, en las aguas superficiales. Se sabe poco sobre el ciclo biológico o las pautas de muda de las arañas de mar, pero después de instalarse sobre el fondo, todos los cangrejos decoradores que he observado mudan dos o tres veces antes de empezar a ornamentarse. Parece que muchos cangrejos araña continúan decorándose a lo largo de toda la vida, aunque algunos, como el macho del cangrejo musgo, *Loxorhynchus crispatus*, dejan de ornamentarse hacia la época en que alcanzan la madurez. (*L. crispatus*, uno de los mayores cangrejos que se encuentran en la costa de California, deja de exhibir el comportamiento de ornamentación cuando la anchura de su caparazón alcanza unos 10 centímetros y la envergadura de sus patas alrededor de los 100 centímetros. Cuando adquiere ese tamaño es presumiblemente inmune al ataque de la mayoría de depredadores.)

Los materiales que las arañas de mar suelen preferir para ornamentar su caparazón son organismos flexibles y fáciles de romper, como esponjas, algas, briozoos y ascidias compuestas. No obstante, los cangrejos utilizan asimismo con frecuencia otros tipos de material, incluyendo algas coralinas (algas endurecidas por un recubrimiento de carbonato cálcico) rosadas o verdes, ramas de gorgonias (corales córneos como los abanicos de mar) de colores vivos, tubos segregados por gusanos poliquetos e incluso hojas de plantas terrestres. El cangrejo araña del Caribe *Stenocionops furcata* fija a su caparazón y patas la pequeña anémona de mar listada *Calliactis tricolor*. Se ha visto que, en acuario, arañas de mar a las que se había despojado de su ornamentación se han decorado con fragmentos de alcionarios, cintas de papel, esquirlas de cemento de la pared del acuario e incluso fragmentos de hamburguesa.

Del mismo modo que los materiales ornamentales pueden diferir de una es-



LOS MATERIALES DE ORNAMENTACION sobre el caparazón y las patas de un cangrejo de la especie *Oregonia gracilis*, en la ilustración de la izquierda, comprenden cortas tiras de algas, segmentos de hidroideos, astillas de madera y varios fragmentos de tubos moteados de arena segregados por gusanos poliquetos. El rostro se atavía de largas ristras de hidroideos, y toda la superficie está recubierta por una capa de algas filamentosas. Las quelas recogen o arrancan un fragmento adecuado de material y lo llevan a las piezas bucales, que manipulan el fragmento hasta que sus bordes son rugosos. Entonces, una de las quelas frota el fragmento contra una zona del caparazón del cangrejo recubierta por hileras de sedas ganchudas. Según el fragmento se mantenga perpendicular a las filas de sedas o paralelo a ellas, es atravesado o queda enmarañado entre las mismas. En la ilustración de la derecha, que corresponde al rostro del cangrejo dibujado a mayor aumento, se ha eliminado en parte la ornamentación para mostrar la manera en que las sedas ganchudas se disponen en esta especie, formando parejas de hileras encaradas. En acuario, se atavían con cintas de papel, esquirlas, etc.



DECORACION MAS AUSTERA, propia del pequeño cangrejo de California *Podochela hemphilli*, que se muestra en la ilustración de la izquierda. En esta especie, que se encuentra alrededor de muelles y de pilones de desembarcaderos, buena parte del caparazón y del rostro se halla desnuda, aunque sobre ellos existen sedas ganchudas. Sin embargo, las patas marchadoras suelen recubrirse de pequeños fragmentos de algas o, como se indica aquí, secciones de briozoos ramificados. La ilustración a mayor aumento a la derecha muestra la manera en que los fragmentos de material de ornamentación quedan clavados en los pequeños grupos de sedas ganchudas y barbeladas que caracterizan a esta especie. También se aprecian en la ilustración varias diatomeas, que con frecuencia se instalan sobre los fragmentos de briozoos ramificados que sobresalen de las patas marchadoras del cangrejo, así como sedas rectas, que funcionan a modo de órganos sensoriales táctiles, para la localización de los materiales de ornamentación.

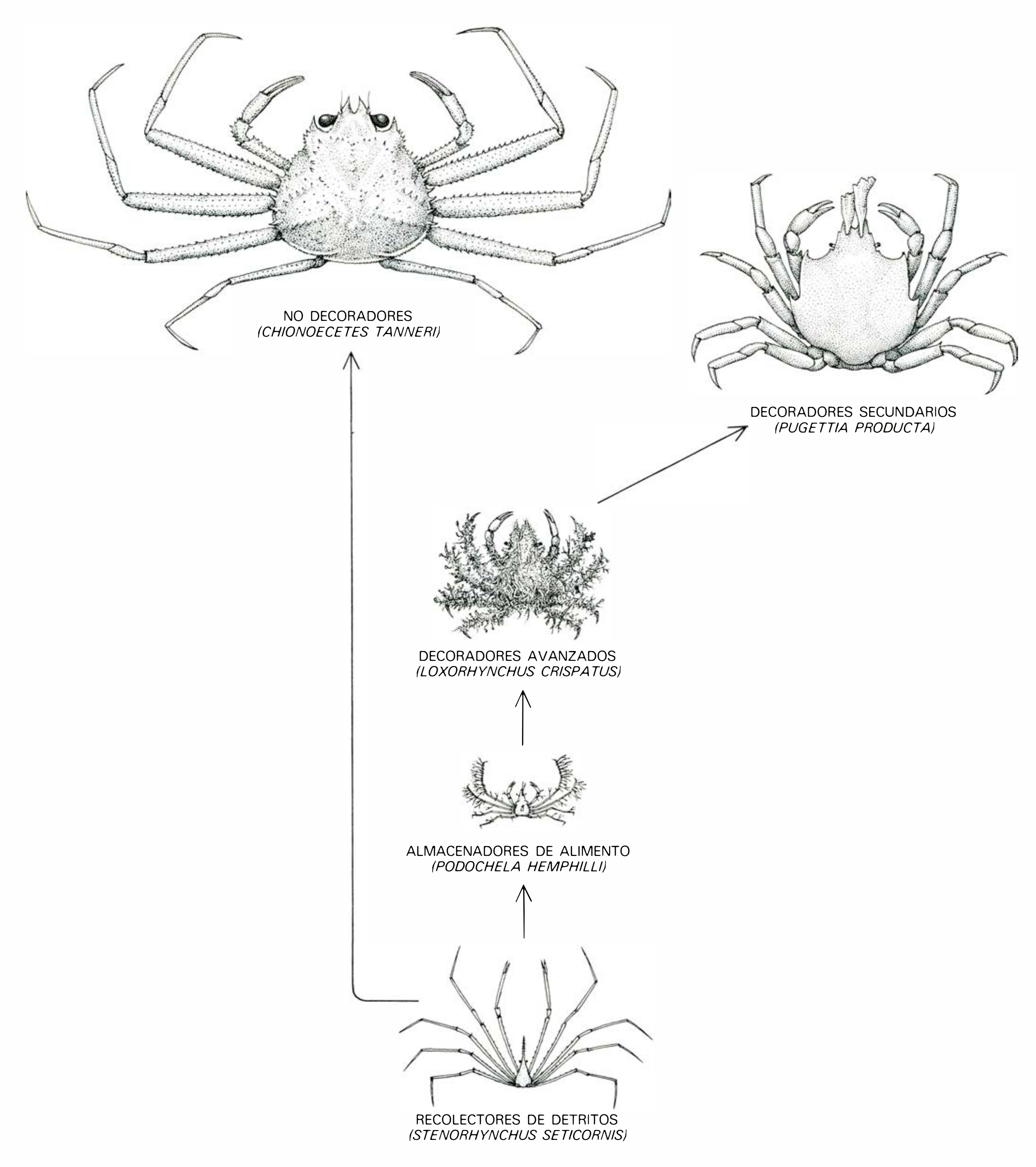
pecie a otra, también varía el estilo de la decoración; comparemos dos cangrejos que se ornamentan intensamente. Un cangrejo juvenil de la especie *Loxorhynchus crispatus* recubre todo su caparazón con una densa capa de algas, briozoos y otros organismos; *Oregonia gracilis*, un cangrejo que se encuentra a lo largo de la costa noroccidental de los Estados Unidos, recubre su caparazón y patas marchadoras, pero fija asimismo a su rostro largas banderolas de algas, briozoos e hidroideos. Entre los decápodos que se ornamentan de manera más parca se cuenta el pequeño cangrejo *Podochela hemphilli*, que frecuenta los muelles y los pilones de los desembarcaderos de California. Este cangrejo suele dejar descubiertos buena parte de su caparazón y rostro, pero fija pequeños fragmentos de algas o de briozoos a sus patas marchadoras, desde las que estos materiales se extienden. La araña de mar *Inachus scorpio*, europea, parece ser aún más selectiva, y decora únicamente su primer par de patas marchadoras.

Algunos cangrejos araña que no se ornamentan activamente resultan cubiertos de manera pasiva, a través de la acumulación natural de detritos en sus sedas ganchudas o debido a la fijación a su caparazón de organismos incrustantes. Por ejemplo, aunque el cangrejo narigudo *Scyra acutifrons*, de la costa pacífica de los Estados Unidos, ornamenta con frecuencia su propio rostro, buena parte de su caparazón está cubierto de esponjas o ascidias que se instalan allí por sí mismas. Y mientras el cangrejillo *Pitho picteti* se desplaza a través de un fondo de arena o de grava del golfo de California, sus sedas ganchudas suelen recolectar una cubierta de arena y restos. Además, pequeñas anémonas de mar y pedazos de esponjas y de ascidias compuestas, sea cual sea la forma en que lleguen a ornamentar el caparazón de un cangrejo, pueden permanecer vivas después de haberse fijado y crecer a partir de la zona de fijación original. Muchos cangrejos araña del género *Pelia*, como el cangrejo de California *Pelia tumida*, tienden a ornamentarse con pequeños fragmentos de esponjas que se regeneran y se extienden hasta cubrir todo el caparazón.

Aunque en todas las subfamilias actuales de Májidos se han identificado especies de cangrejos decoradores, muchas arañas de mar no se ornamentan en absoluto. Por ejemplo, como ya se ha mencionado, *Loxorhynchus crispatus* no se decora después de haber alcanzado un determinado tamaño. Otros grandes cangrejos araña o centollos (especies con una envergadura de las patas de 75 centímetros o más) que no se ornamentan cuando adultos son: la cabra de California, *Loxorhynchus grandis*, el cangrejo gigante del Caribe, *Mithrax spinosissimus*, el cangrejo panamericano, *Maiopsis panamensis* y el cangrejo gigante japonés, *Macrocheira kaempferi*. (Con una envergadura de las patas de hasta 4,25 metros, es el mayor cangrejo del mundo.)

El tamaño no es el único factor que puede impedir que una araña de mar se engalane. Las especies que poseen un caparazón con bultos y espinas que ya imita al sustrato en que habitan, por lo general no se decoran. De ahí que los cangrejos araña llenos de gibosidades del género tropical *Mithrax*, que viven sobre fondos duros, rocosos, tienden a permanecer totalmente libres de decoración, con excepción de unos pocos organismos incrustantes que se instalan por sí mismos. Los cangrejos araña que viven entre los estípites, o partes semejantes a tallos, de las algas gigantes tienden a no ornamentarse, posiblemente debido a que al trepar por el alga se desprendería cualquier material decorativo. Así, el cangrejo de la laminaria parda *Pugettia producta*, que por lo general se encuentra entre las laminarias pardas gigantes de la costa californiana, no llega a ornamentarse, y únicamente fija fragmentos de laminaria a su rostro. El cangrejo de la laminaria purpúrea, *Taliepus nuttalli*, no exhibe forma alguna de comportamiento de ornamentación. Finalmente, las arañas de mar que viven sobre sustratos blandos, como los cangrejos curtidores del género *Chionoecetes*, raramente se atavían, probablemente debido a la falta de materiales ornamentales en los fondos de arena o fango.

Es importante señalar que aunque un cangrejo inmóvil y bien ornamentado puede ser difícil de ver en su hábitat natural, en algunos casos la copia no



EVOLUCION DEL COMPORTAMIENTO de decoración en las arañas de mar, tal como se desprende de las pautas de comportamiento de las especies actuales. Puesto que las primeras actividades de la ornamentación (encontrar un fragmento adecuado de material y llevarlo hasta las piezas bucales) son idénticas a las actividades de la alimentación, la decoración se inició probablemente con arañas de mar primitivas que recogían partículas alimenticias de entre los detritos. Algunos de estos cangrejos pudieron parecerse a la especie actual *Pyromaia tuberculata* (no representada), que se alimenta de restos que encuentra sobre el fondo. Otros pudieron ser semejantes al actual cangrejo flecha *Stenorhynchus seticornis*, que toma partículas alimenticias de los restos que recoge sobre sus sedas ganchudas. Andando el tiempo, algunos de estos primitivos cangrejos araña pudieron haberse dedicado a almacenar alimento en sus sedas ganchudas, del mismo modo que lo hacen algunos cangrejos decoradores actuales, como la especie *Podochela hemphilli*. La costumbre de fijar alimento al caparazón pudo haber tenido una ventaja selectiva para los primeros cangrejos, al esconderlos de los depredadores, y algunos de ellos pudieron haber realizado la transición a la fijación de materiales no comestibles con el único propósito del enmascaramiento. Los cangrejos actuales que se ornamentan con mayor abigarramiento, como el cangrejo musgo, *Loxorhynchus crispatus*, raramente comen nada de lo que han fijado a su caparazón, y con frecuencia se ornamentan con materiales que pocos animales marinos comen, incluyendo esponjas nocivas e hidroideos urticantes. El ejemplar de *L. crispatus* que aquí se ilustra es un juvenil; los machos adultos de esta especie, una de las mayores de la costa de California, dejan de ornamentarse cuando alcanzan la madurez. Lo mismo ocurre en machos y hembras de otras especies de grandes cangrejos decoradores. Entre las especies actuales de cangrejos araña que también se atavían poco o nada en absoluto, algunas, como el cangrejo de laminaria, *Pugettia producta*, pueden haber perdido buena parte de su costumbre de ornamentación en respuesta a presiones ambientales (*véase la ilustración dos páginas más adelante*); otras, como el cangrejo curtidor, *Chionoecetes tanneri* (cuyo hábitat de fondos blandos carece de materiales ornamentales), pueden no haber adquirido la costumbre de decorarse. Los cangrejos araña ilustrados se han dibujado a la misma escala.

es en absoluto exacta. He visto un cangrejo araña, en el que se habían incrustado ascidias blancas, instalado en un campo de algas de color rojo oscuro, y otro decorado con ascidias anaranjadas, hidroideos amarillos, algas rojas y esponjas azules descansando sobre un lecho de algas coralinas de color rosa vivo. *Loxorhynchus crispatus* puede detectarse por lo general si se buscan manchas de briozoos muertos y blanqueados. Es más, si se coloca en un acuario al cangrejo decorador del Caribe *Microphrys bicornutus* contra un fondo cuyo color contraste con el recubrimiento del cangrejo, éste no hace ningún esfuerzo por ajustar el color. En una situación similar, un pequeño cangrejo de la especie *Loxorhynchus crispatus* entremezclará material del nuevo ambiente con los fragmentos de decoración ya acumulados.

Estos ejemplos reflejan con probabilidad el hecho de que los cangrejos que viven en arrecifes caracterizados por una biota diversa encontrarán al desplazarse de un lugar a otro una gran dificultad a la hora de intentar imitar cada fondo distinto. De manera más general, parece que el hecho de ornamentarse no sirve para que un cangrejo araña se vuelva invisible, sino para que se parezca menos a un cangrejo. Para conseguir este objetivo el cangrejo debe gastar energía metabólica que podría destinar a otras importantes actividades, como comer o aparearse. ¿Qué es lo que el animal obtiene a cambio? es decir, ¿cuál es la función del comportamiento de decoración?

Para empezar, en varias especies el enmascaramiento que proporcionan las actividades de ornamentación parece facilitar la captura de la presa. Por ejemplo, se ha observado en acuario a peces y otras presas nadadoras acercarse a cangrejos inmóviles de las especies europeas, bien ornamentadas, *Hyas araneus* (un cangrejo lira) y *Macropodia rostrata,* y ser capturados por ellas. Y en los acuarios de mi laboratorio de la Universidad de California Meridional, otro cangrejo lira, *Hyas liratus,* ha demostrado ser un voraz depredador de cangrejos más pequeños, a los que su compleja decoración le permite a menudo aproximarse sin ser advertido. No obstante, la mayoría de arañas de mar se alimentan de carroña, de organismos que carecen de ojos, como los equinodernos (dólares de la arena, erizos de mar, estrellas de mar, etcétera), de organismos que se mueven lentamente, como moluscos y gusanos poliquetos, y de plantas y animales sésiles, como algas o ascidias. Evidentemente, no hay necesidad alguna de camuflaje para capturar a estos organismos, y para los cangrejos araña que se alimentan de estas presas la principal función de la decoración es, a buen seguro, proporcionar protección frente a los depredadores.

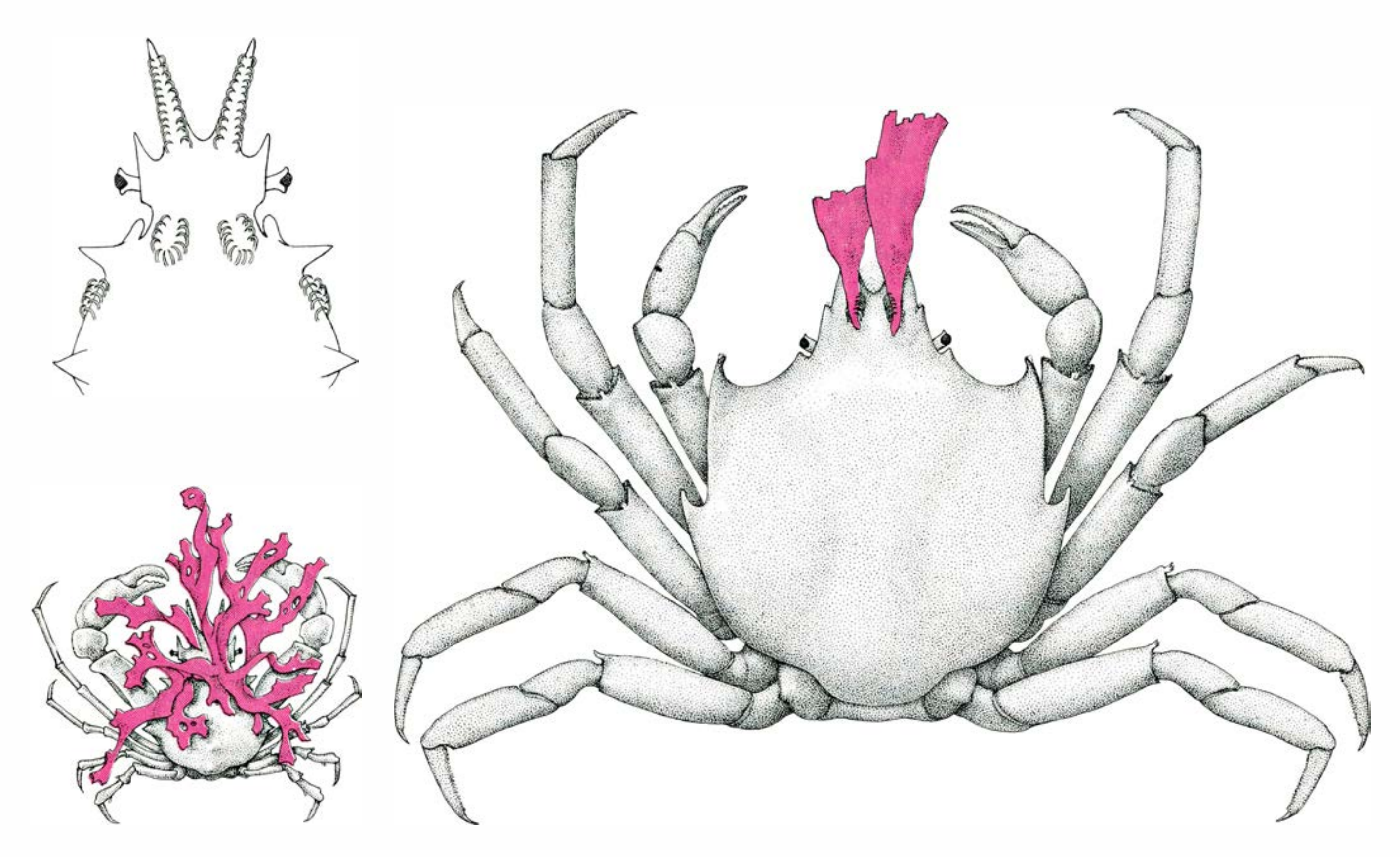
Entre los animales que hacen presa en los cangrejos decoradores se incluyen el bogavante europeo. *Homarus gammarus,* la nutria de mar, *Enhydra lutris,* y una gran variedad de peces, pulpos, estrellas de mar, langostas, otros cangrejos e incluso seres humanos suficientemente arriesgados. Sin embargo, durante las horas de luz diurna la mayor parte de cangrejos decoradores se hallan efectivamente enmascarados por la ornamentación de su caparazón y su falta de movimiento. Los cangrejos pasan el día planos sobre el fondo, con sus quelas dobladas bajo ellos. El único movimiento es el de las antenas, que surgen de la superficie ventral del cangrejo, y por lo general se hallan escondidas de la vista por la ornamentación que cuelga por encima de ellas. De ahí que en acuario, ejemplares bien ornamentados de *Loxorhynchus crispatus, Pelia tumida* y *Pugettia richi* (un cangrejo de laminaria que se encuentra en la costa pacífica de los Estados Unidos) resulten rara vez comidos por los depredadores. De modo similar, aunque las nutrias de mar que viven en aguas de Pacific Grove, California, se alimentan con frecuencia del cangrejo de laminaria *Pugettia producta,* que está muy poco ornamentado, raramente han sido observadas comiendo cangrejos de la especie *L. crispatus,* que se encuentran allí en abundancia.

El enmascaramiento de un cangrejo decorador no es su única forma de protección; los cangrejos araña exhiben varios tipos de comportamiento, además de la decoración, que les ayudan a evitar a los depredadores. Por ejemplo, aunque muchos estudios sobre el comportamiento de las arañas de mar han puesto de manifiesto los movimientos lentos y deliberados que caracterizan el comportamiento de estos animales durante el día, se los puede ver de noche andando abiertamente a través de los fondos de arena, trepando a las laminarias o merodeando sobre los arrecifes. Un cangrejo araña amenazado por un depredador correrá, exhibirá sus quelas, pellizcará al depredador o bien autotomizará, es decir, permitirá que se rompa, una pata que haya sido cogida por su enemigo. Un cangrejo que esté huyendo de un depredador se dejará caer a menudo con sus patas extendidas de una cornisa subacuática para aterrizar sobre el fondo situado más abajo. (El cangrejo europeo *Macropodia rostrata* es la única araña de mar de la que se sabe que nada.)

Además, los materiales que un cangrejo araña fija a su caparazón no sólo le protegen ocultándolo. Las esponjas y las ascidias compuestas que se encuentran sobre los caparazones de muchos cangrejos decoradores pueden ser nocivas o incluso tóxicas para sus depredadores. Los hidroideos y las anémonas de mar suelen poseer nematocistos, células urticantes especializadas, que pueden obligar al depredador a que suelte al cangrejo capturado. En acuario, cuando tres peces que se alimentan de cangrejos (el cabezón, el charrasco lavanda y la escorpena de California) capturaban pequeños cangrejos de las especies *Loxorhynchus crispatus* y *Pelia tumida,* los escupían inmediatamente.

Asimismo, para un pulpo en busca de comida, un cangrejo peludo y ataviado puede no parecerse en absoluto a un cangrejo. Dos pequeños ejemplares de *L. crispatus* que se hallaban en un acuario con 15 pulpos sobrevivieron sin daño, mientras que cangrejos de otras especies colocadas en el acuario fueron capturados y comidos. Uno de los dos cangrejos decoradores incluso mudó y se volvió a ornamentar con pedazos de los crustáceos que habían sido presa de los pulpos. (Los cangrejos son muy vulnerables al ataque cuando mudan o cuando su caparazón está deteriorado. Sin embargo, cuando *L. crispatus, L. grandis* y el cangrejo neozelandés *Notomithrax ursus* mudan, inmediatamente quitan fragmentos del material ornamental del caparazón abandonado y los fijan al nuevo. La muda tiene lugar por la noche o de buena mañana, cuando es difícil ver incluso a un cangrejo desnudo. Al cabo de un día el cangrejo tiene un nuevo caparazón, duro y completamente decorado.)

La complicada cadena de actividades que constituyen el comportamiento de decoración en las arañas de mar es probablemente el resultado de un largo proceso evolutivo. Por desgracia, no hay muchos cangrejos fósiles disponibles para ayudar a la reconstrucción del proceso, pero la consideración de las distintas pautas de comportamiento que exhiben las especies modernas de cangrejos decoradores sugiere una posible secuencia evolutiva. Para empezar, es interesante señalar que las primeras maniobras de la ornamentación (recoger materiales y dirigirlos hacia las piezas bucales) son similares a las actividades de alimentación. Parece probable que la evolución del comportamiento de decoración comenzara con cangrejos primitivos que recogían bocados de comida de entre los detritos. Algunos de estos crustáceos pudieron haberse parecido al mo-



ALGUNOS CANGREJOS DE LAMINARIA del género *Pugettia* parecen haber perdido el comportamiento de ornamentación. Las especies pequeñas, como *Pugettia dalli (izquierda)*, que viven entre algas de poca altura o sobre los rizoides de laminarias mayores, decoran los lados del caparazón y el rostro, generalmente con fragmentos de laminaria (*color*). La distribución de las sedas ganchudas sobre el caparazón de estos cangrejos de laminaria se indica en el dibujo a mayor escala de la parte izquierda superior. El cangrejo grande de laminaria, *Pugettia producta* (*derecha*), que vive entre los estípites de las laminarias gigantes, sólo camufla el rostro, y carece de las sedas ganchudas a lo largo del borde del caparazón y detrás de los ojos que caracterizan a las especies más pequeñas. *P. producta* es probablemente una especie avanzada que perdió la mayor parte de sus costumbres de ornamentación cuando pasó de las laminarias pequeñas a las mayores. Los cangrejos de esta ilustración se han dibujado a la misma escala.

derno cangrejo araña *Pyromaia tuberculata*, que separa partículas alimenticias de los detritos del fondo. Otros pudieron semejarse a los cangrejos flecha del género *Stenorhynchus* y al pequeño cangrejo araña californiano *Erileptus spinosus*, que se cuelgan de gorgonias y de otros lugares altos y, extendiendo sus patas en una corriente, reúnen detritos de los que más tarde extraerán partículas comestibles,

Un estadio posterior en el proceso evolutivo pudo haber sido el almacenamiento en las sedas de alimento no comido. El cangrejo araña *Podochela hemphilli* se nutre a veces de fragmentos de alga que ha extraído de su caparazón. Y en los acuarios de mi laboratorio el cangrejo decorador tropical *Camposcia retusa* fijaba a las sedas ganchudas de sus primeras patas marchadoras pedazos de peces desmenuzados, que más tarde comía. La fijación de alimento no comido a las sedas pudo haber dado a los cangrejos primitivos la ventaja selectiva de esconderlos de los depredadores.

Hay especies, como *Loxorhynchus crispatus* y *Pelia tumida*, que generalmente no comen nada que hayan fijado a su caparazón. De hecho, estas especies se suelen camuflar con esponjas, ascidias, anémonas de mar y otros organismos nocivos que pocos animales marinos comen. Ello sugiere que, en un momento determinado, los primitivos almacenadores de alimento debieron pasar de fijar sobre sí mismos materiales comestibles a fijar otros no comestibles que sólo proporcionaran camuflaje.

Las pautas de ornamentación de los cangrejos de laminaria del género *Pugettia* sugieren otra secuencia evolutiva, esta vez apartándose de la decoración. Las pequeñas especies *Pugettia richi, P. hubbsi, P. dalli* y *P. gracilis*, que viven entre algas de poca altura o en los rizoides de las laminarias, que son mayores, decoran su rostro y los costados de su caparazón. El cangrejo *P. producta*, de mayor tamaño y que vive entre los estípites de las laminarias gigantes, sólo adorna su rostro. *P. producta* carece de sedas ganchudas laterales, su caparazón tiene una forma subcuadrada y su tamaño es grande; todo ello indica que se trata de una especie avanzada que pudo haber perdido la costumbre de ornamentarse al dejar las algas pequeñas por las laminarias mayores. De forma similar, *P. venetiae*, que vive en fondos arenosos, tampoco se atavía. Pudo haber perdido la pauta de comportamiento al tiempo que se instalaba en un hábitat en el que escaseaban los materiales ornamentales.

Al estudiar las relaciones entre distintas especies de aves y mamíferos, las comparaciones del comportamiento han resultado con frecuencia de gran valor. Es posible que la aplicación de métodos similares al estudio del comportamiento de decoración sea asimismo revelador. Se conocería mucho mejor la historia evolutiva de las arañas de mar si se comparara en distintas especies la morfología y la distribución de las sedas ganchudas, las pautas de fijación de los materiales de ornamentación, los tipos de materiales elegidos, el grado de decoración que se consigue y las variaciones en el comportamiento de decoración según el tamaño, el sexo o la edad. En la actualidad, todavía es poca la información que se posee sobre la historia natural de la mayoría de especies de cangrejos araña. Si se han de realizar evaluaciones cuantitativas y significativas de su comportamiento de decoración, se requerirán observaciones más precisas.

Juegos matemáticos

Coloreando mapas insólitos, podemos descubrir tierras vírgenes fabulosas

Martin Gardner

"Lo sé por el color. Seguro que aún estamos sobre Illinois (Huckleberry Finn y Tom viajan en globo; Huckleberry habla). Y tú mismo puedes ver que todavía no tenemos Indiana a la vista..."

"¿Y qué tiene que ver el color con todo eso?

"Lo tiene todo que ver. Illinois es verde, Indiana, rosa... Yo mismo lo he mirado en el mapa, y es toda de color rosa..."

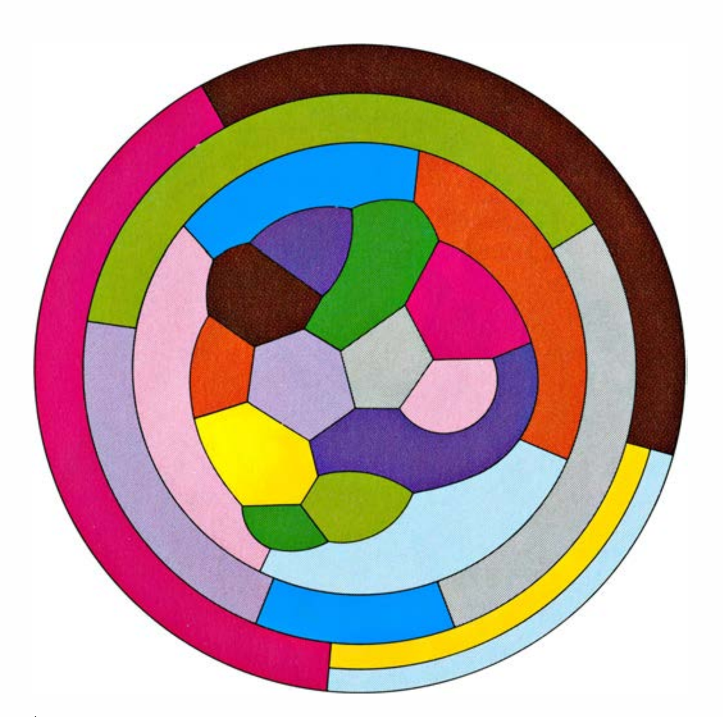
MARK TWAIN, *Tom Sawyer Abroad*

En 1976, Wolfgang Haken y Kenneth Appel, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, anunciaron haber puesto epitafio al famoso problema del mapa de cuatro colores. Como ya sabe el lector, esta famosa conjetura topológica afirma que, para colorear todo el mapa que pueda trazarse sobre un plano o una esfera sin que ningún par de regiones "limítrofes" (regiones que comparten un segmento de frontera común) sean de un mismo color, son necesarios y suficientes cuatro colores. Haken y Appel, ayudados por John Koch, demostraron que la conjetura es cierta, pero por métodos que descansaban en el empleo de ordenadores como nunca hasta entonces. La demostración es logro extraordinario, y cuando en 1977 se publicó el informe donde Haken y Appel explicaban su trabajo, la oficina postal de Urbana añadió con orgullo la divisa "cuatro colores bastan" a su matasellos. Empero, casi todos los matemáticos concuerdan en que la demostración de la conjetura de los cuatro colores dista mucho de ser satisfactoria.

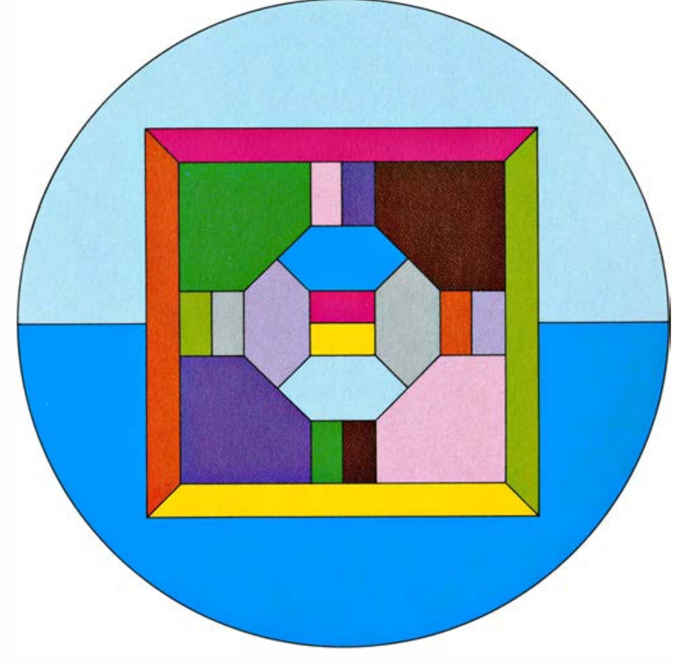
Durante más de un siglo, los topólogos sospecharon que o bien podría idearse un contraejemplo que invalidase la conjetura (es decir, un mapa muy complicado que exigiese cinco colores o más), o bien confiaron en que podría descubrirse una demostración sencilla y elegante. Aunque ahora se sabe que la conjetura es cierta, su demostración está enterrada bajo la montaña de impresos producidos por un ordenador a lo largo de 1200 horas de funcionamiento. La verificación directa de la exactitud de estos resultados es tarea tan horrenda que tan sólo un pequeño número de especialistas ha tenido el tiempo, la entereza de ánimo y la capacidad necesarios para intentarlo siquiera. Sin embargo, hasta ahora, todos quienes lo han hecho así han atestiguado la validez de la demostración.

En un artículo titulado "The Four-Color Problem and Its Philosophical Significance", publicado en *The Journal of Philosophy* (vol. 76, n.º 2, páginas 57-83; febrero 1979), Thomas Tymocko sostiene que este tipo de enormes demostraciones, conseguidas mediante ordenador, introducen en las matemáticas elementos empíricos. Ningún matemático, escribe allí, ha podido ver una demostración del teorema de los cuatro colores, ni nadie ha visto una demostración de que el trabajo de Haken y Appel sea verdaderamente una demostración. En cambio, lo que los matemáticos han podido ver es un programa para atacar el problema mediante ordenador más los resultados de un "experimento" realizado en un ordenador concreto. En opinión de Tymocko, tales "demostraciones" difuminan la distinción entre las matemáticas y las ciencias de la naturaleza; y en filosofía de las ciencias dan crédito a opiniones como la de Hilary Putnam, que consideran las matemáticas como actividades "cuasi-empíricas".

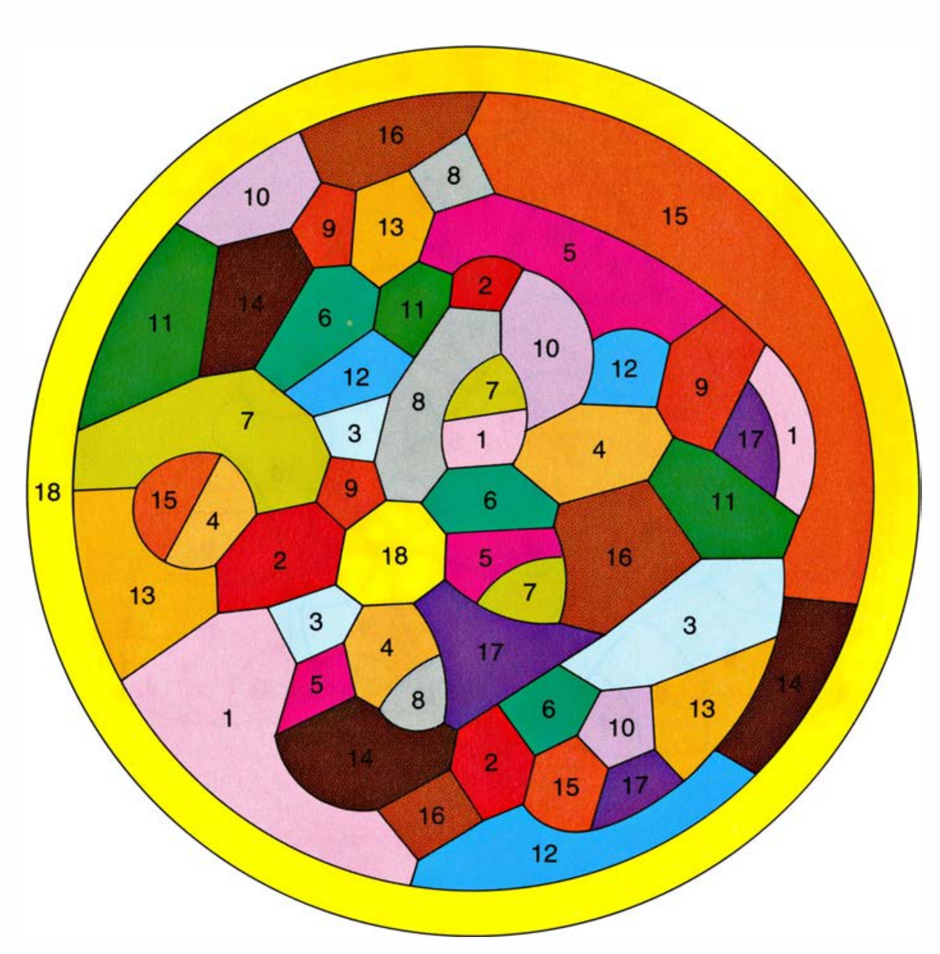
Desde luego, algo hay en este punto de vista. Toda demostración matemática es obra de seres humanos, y cuando las demostraciones resultan muy complica-



Mapa "2-perio" de Percy Heawood, que exige 12 colores



Variante simétrica del mapa de Heawood, debida a Scott Kim



El problema del **m**-*perio exige 18 colores cuando* **m** *vale 3, como demuestra este mapa de Herbert Taylor*

das cabe siempre la posibilidad de error humano. La invalidez de una demostración difícil descansa en última instancia en la unanimidad de juicio de los especialistas, y después de todo, éstos pueden equivocarse. Hay en la historia del teorema de los cuatro colores un ejemplo impresionante. En 1897, un matemático inglés, Alfred Bray Kempe, publicó la que él pensaba ser una demostración del teorema; durante un decenio, los matemáticos presumieron que el problema estaba resuelto. Luego, en 1890, Percy John Heawood, otro matemático inglés, hizo ver un fallo irremediable en el razonamiento de Kempe.

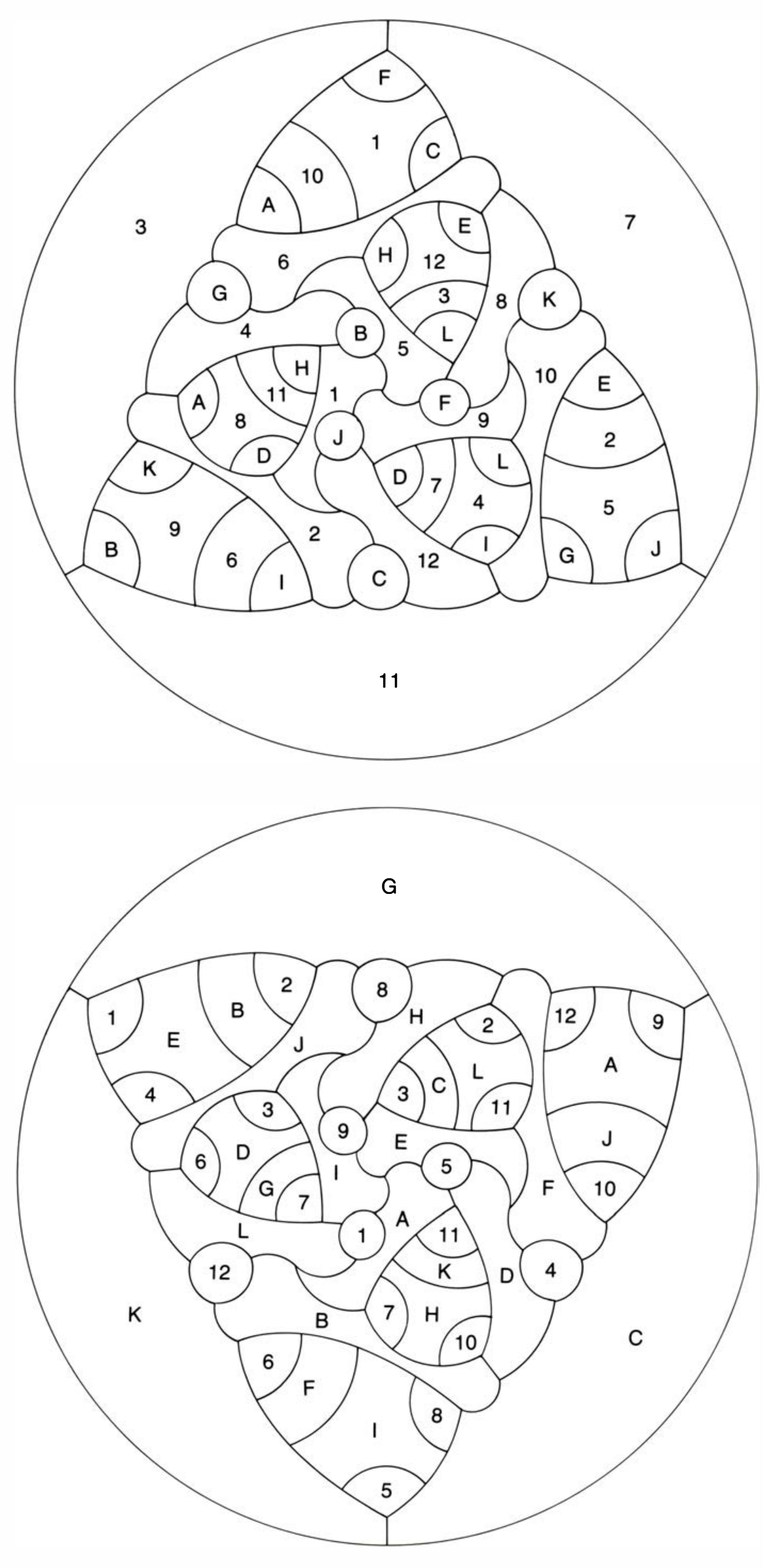
No tengo aquí el propósito de examinar la cuestión de si existe una línea divisoria nítidamente trazada entre la verdad "analítica" y la verdad "sintética". Solamente diré que, en mi opinión, Tymocko supervalora demasiado la importancia del papel que los modernos sistemas de proceso de datos puedan tener en esta vieja controversia. Todo cálculo es empírico en el trivial sentido de que requiere efectuar un experimento con símbolos, ya sea mentalmente, ya con lápiz y papel, ya con auxilio de una máquina. El hecho de que en los ordenadores electrónicos, hoy esenciales para efectuar cálculos difíciles, puedan cometerse tanto fallos en el soporte físico –*software*– (de origen humano) como en el soporte lógico –*hardware*– (fallos mecánicos o eléctricos) no marca diferencias esenciales con los errores que pueda cometer una persona que multiplique dos números grandes con un ábaco. Me parecería un abuso de lenguaje afirmar que la posibilidad de tales errores hace que la veracidad de la tabla de multiplicar sea de carácter empírico, y declarar en consecuencia que este tipo de errores inevitables sea clara muestra de la falibilidad de la ciencia natural.

Empero, la demostración de Haken y Appel es desde luego insatisfactoria, pues nadie podría decir que sea sencilla, bella o elegante. Tanto Haken como Appel consideran improbable que pueda hallarse una demostración sin utilizar ordenadores exhaustivamente; pero claro, no hay forma de saberlo con certeza. Si no existen demostraciones más sencillas, la demostración de Haken y Appel será, desde luego, algo enteramente nuevo, por el grado en que depende de la tecnología de proceso de datos.

La situación ha sido examinada con gran competencia por Benjamin L. Schwartz en un libro del que es editor, de título *Mathematical Games and Solitaires*. Publicado el pasado año por la Baywood Publishing Company of Farmington, N.Y., el libro, que recomiendo con el mayor entusiasmo, es una selección de artículos tomados del *Journal of Recreational Mathematics*. En la introducción que Schwartz ha escrito para una sección relativa al teorema de los cuatro colores se dice: "Así pues, podríamos preguntarnos ¿han demostrado verdaderamente Haken y Appel lo que afirman?... Personalmente opino que sí... pero el período de prueba aún no ha terminado. Otros habrán de ir comprobando cada paso. Y dado que (casi todos) los pasos fueron realizados en muchos cientos de horas de funcionamiento de un ordenador rápido, la comprobación será tarea gigantesca. En el momento de escribir, nadie la había realizado. Habrán de prepararse nuevos códigos de ordenador, quizá para modelos distintos... ¿Comenzará a ceder la pertinaz resistencia de otros tenaces problemas matemáticos ante el nuevo método de ataque masivo por ordenador, o se trata de una chiripa, que no tendrá consecuencias duraderas? Esta demostración del teorema de los cuatro colores abre las puertas de una nueva era en matemática, y nadie sabe adónde nos conducirá.

En el mes de diciembre de 1976, G. Spencer-Brown, montaraz matemático inglés, dejó boquiabiertos a sus colegas anunciando disponer de una demostración del teorema de los cuatro colores que no exigiría comprobar el trabajo de ningún ordenador. La superlativa confianza de Spencer-Brown en su trabajo, y su reputación como matemático, dieron como fruto una invitación para dirigir un seminario sobre su demostración en la Universidad de Stanford. Al cabo de tres meses, los especialistas que asistieron al seminario estuvieron de acuerdo en que, desde el punto de vista lógico, la demostración de Spencer-Brown mostraba más de un agujero, aunque Spencer-Brown regresó a Inglaterra convencido todavía de que su demostración era válida. La "demostración" todavía no ha sido publicada.

Spencer-Brown es autor de un curioso librito llamado *Laws of Form*, que en esencia es una reconstrucción del cálculo proposicional expresado mediante una extravagante notación. El libro, que el matemático inglés John Horton Conway describió en cierta ocasión como bellamente escrito aunque "libre de todo contenido", tiene amplio círculo de devotos en medios contraculturales. Por cierto, al poco tiempo de que los



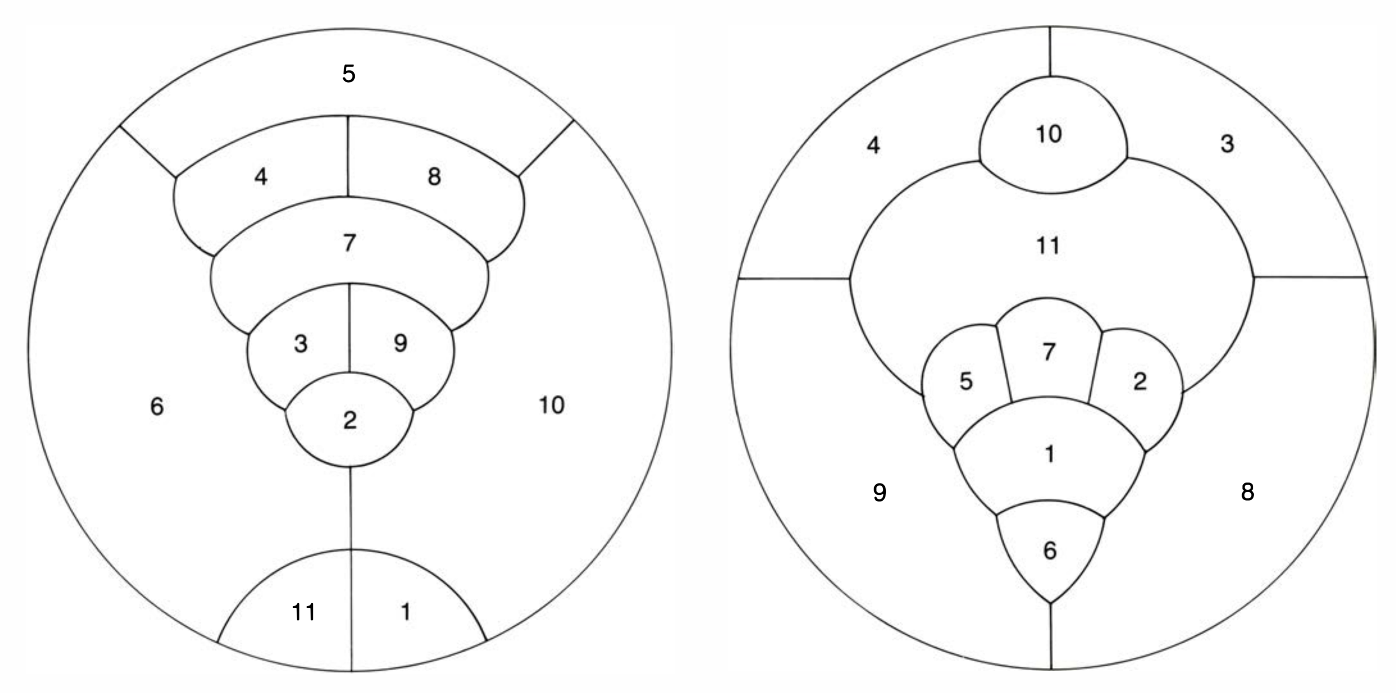
Mapa de dos hojas ideado por Taylor para probar que si **m** *vale 4 son precisos 24 colores*

periódicos de todo el mundo hubiesen informado que Brown proclamaba haber demostrado el teorema de los cuatro colores, el *Vancouver Sun* del 17 de enero de 1977 daba cuenta de una carta enviada por una lectora de Columbia Británica. En ella decía que Brown no podía haber demostrado el teorema, porque en abril de 1975 *Scientific American* publicó un mapa que exigía cinco colores. ¡Se estaba refiriendo a un mapa que apareció en esta sección como inocentada del primero de abril!

En tanto los topólogos persisten en la búsqueda de una demostración sencilla para el teorema de cuatro colores, otras personas están trabajando también en dos fascinantes y no muy conocidas generalizaciones del problema, todavía no resueltas. En cuanto sigue, me basaré casi exclusivamente en una comunicación particular enviada por Herbert Taylor. Inicialmente fue matemático de la Universidad estatal de California en Northridge y en el Jet Propulsion Laboratory del Instituto de Tecnología de California; en la actualidad está estudiando ingeniería eléctrica con Solomon W. Golomb en la Universidad de California meridional, y se le considera como uno de los tres máximos jugadores no orientales de "go".

Tal como hace notar Taylor, una vía para generalizar el problema de los cuatro colores consiste en estudiar mapas donde cada país o zona a colorear esté formado por m territorios desconectados. Suponiendo que todos los territorios de un mismo país hayan de ser del mismo color, ¿cuál será el mínimo número de colores necesarios para colorear todo mapa posible, de forma que ningún par de regiones del mismo color compartan frontera común? Taylor ha bautizado esta cuestión con el nombre de problema del número cromático del m-perio.

Cuando m sea igual a 1 (es decir, si cada país está formado por un único territorio), el problema equivale al de los cuatro colores, y Haken y Appel han establecido ya que el número cromático es 4. Si m es igual a 2 (imaginemos que cada país tenga una colonia que habrá de ir de su mismo color), el número cromático es 12. Sorprendentemente, este resultado fue dado a conocer por Heawood, en 1890, en el mismo artículo en que reducía a polvo la demostración de Kempe para el teorema de los cuatro colores. Dicho de otra forma, la solución del problema del m-perio para el caso $m = 2$ se obtuvo mucho antes que en el caso $m = 1$. En su demostración, Heawood probaba primero que para todo entero positivo m, el número de colores



Configuración de Thom Sulanke para el problema Tierra-Marte

necesarios para un mapa m-perio nunca es mayor que $6m$. Seguidamente, Heawood exhibió un mapa "2-perio" que requería 6x2, o sea, 12 colores, mapa que decía haber "encontrado con mucha dificultad, y por métodos más o menos empíricos [¿acaso m-píricos?]". Dicho mapa puede verse en la ilustración de la parte izquierda de la página 110.

Observemos que el mapa de Heawood carece de simetría. Taylor encontró una versión bastante simétrica (que puede obtenerse a partir del mapa que vemos en la parte superior de la ilustración, contrayendo a un punto las regiones marcadas con una letra), pero el mapa más simétrico hoy conocido fue preparado por Scott Kim, estudiante de segundo ciclo de la Universidad de Stanford. El hermoso mapa de Kim se muestra en la ilustración derecha de la página 110. Como de su propio mapa hizo notar Heawood, "cuales sean las variedades esenciales que pueda haber de mapas con 12 países divididos en dos... es problema curioso, sobre el que no da gran indicación la única figura conseguida".

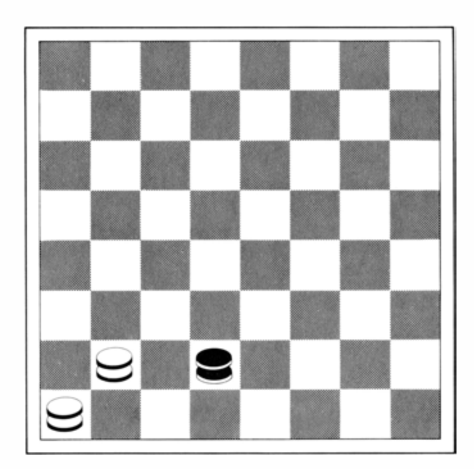
Heawood estaba convencido de que el número cromático de todos los mapas m-perios sería $6m$. Examinando los mapas de Heawood y Kim correspondientes al caso $m = 2$, se ve que cada 2-perio toca a todos los demás, lo que prueba que son necesarios 12 colores. Heawood pensaba que para cada m existiría una configuración especial, formada por $6m$ regiones, donde cada m-perio tocaría a todos los demás. Taylor demostró recientemente que la conjetura es verdadera cuando m es igual a 3, construyendo el mapa de la página 111 que exige 6x3, o sea, 18 colores. (Notemos que tan sólo dos regiones del mapa están numeradas 18 y pintadas de amarillo. La tercera región de este 3-perio está desconectada del resto del mapa, y puede situarse en cualquier lugar del plano.)

Posteriormente, Taylor confirmó también la conjetura de Heawood para el caso $m = 4$ construyendo un mapa de dos partes, que vemos en la página 112. Podemos imaginar las dos partes del mapa como los dos hemisferios de una bola terrestre. (Cualquier mapa trazado en una superficie esférica puede transformarse en un mapa planar topológicamente equivalente, perforando la superficie por cualquier punto interior a una región y estirando el agujero hasta adosar la superficie sobre un plano.) Observemos que cada 4-perio del mapa toca a todos los demás, lo que demuestra que para el problema del 4-perio son necesarios 24 colores. Todos estos resultados son publicados por primera vez aquí. La conjetura de Heawood está sin comprobar en los casos $m =$ 5 y superiores. No obstante, para mapas trazados sobre la superficie de un toro, Taylor ha resuelto hace poco el problema del m-perio; y ha presentado una comunicación al respecto titulada "The m-pire Chromatic Number of the Torus Is $6m + 1$", que se publicará en el *Journal of Graph Theory*. El problema permanece abierto para toros con más de un agujero.

En 1959, en un libro alemán dedicado al problema de coloreado de grafos, Gerhard Ringel planteó otro problema íntimamente relacionado con el problema de los m-perios. Supongamos que Marte haya sido colonizado por las naciones de la Tierra, y que cada nación tenga una metrópoli en nuestro planeta y una colonia en Marte. Cada territorio (terrestre o marciano) es simplemente conexo (sin agujeros), y cada colonia es del mismo color que su metrópoli. Lo mismo que antes, el problema consiste en hallar el mínimo número de colores suficientes para colorear todos los mapas posibles sobre las dos esferas, de forma que no se toquen ningún par de regiones del mismo color, salvo posiblemente en puntos aislados. Como los mapas trazados sobre esferas son equivalentes a mapas planares, el mismo problema puede enunciarse para dos mapas distintos trazados sobre el plano.

Ringel demostró que el número cromático de cualquier mapa biesférico tiene que ser 8, 9, 10, 11 o 12. La cota superior 12 se deduce de la cota superior de Heawood ($= 6m$) para el problema m-perio, como sigue. Supongamos que un par de mapas precisase más de 12 colores. Podríamos entonces convertirlos en mapas planares y, uniéndolos, crear un mapa 2-perio que necesitaría más de 12 colores, contraviniendo así la cota superior ya demostrada, que es $6m$.

Ringel aventuró que el número cromático de los mapas Tierra-Marte es 8, hipótesis que ganó fuerza en 1962, cuando Joseph Battle, Frank Harary y Yukihiro Kodama demostraron que sería imposible construir un mapa biesférico con nueve 2-perios de suerte que



Solución del problema de damas del mes pasado

cada 2-perio tocase a todos los demás. Sin embargo, en 1974, Tom Sulanke, a la sazón estudiante de la Indiana University, envió a Ringel el par de mapas dibujados en la página 114. Estos mapas ven la luz por primera vez aquí. Si se intenta colorear los once 2-perios, de forma que cada par de regiones del mismo número reciban el mismo color, se verá que son imprescindibles nueve colores. Así pues, para colorear los mapas Tierra-Marte son necesarios al menos nueve colores, mientras que 12 siempre serán suficientes. Nadie sabe todavía si será posible construir pares de mapas como éstos, que requieran 10, 11 o 12 colores.

También podemos combinar el problema de las dos esferas con el problema del m-perio. Por ejemplo, supongamos que m sea igual a 4, y que cada esfera sea un mapa donde cada país tiene exactamente dos regiones. Imaginando que las figuras de la ilustración de la página 112 sean dos mapas independientes, uno de la Tierra y otro de Marte, vemos que en el caso $m = 4$ el número de colores necesarios es 24. Sabemos ya que 24 colores son suficientes, pues también es aplicable aquí la cota superior de Heawood, $6m$. Por consiguiente, el problema está resuelto. Taylor ha conjeturado que, para todo entero par m, existe un mapa formado por $6m$ m-perios trazados sobre una superficie constituida por $m/2$ esferas, de forma que cada m-perio tenga dos de sus m partes en cada esfera, y que cada m-perio toque a todos los demás.

Terminaré con un delicioso rompecabezas de coloreado, relativo al mapa de los Estados Unidos. Olvidemos Hawai y otros territorios desconectados del continente, pertenecientes a algunos estados, como las islas de Nueva York y California, y observaremos que en el mapa de los 49 estados continentales de los Estados Unidos, nunca aparecen cuatro estados que sean todos mutuamente fronterizos. (No sucede así en otros países. Por ejemplo, en Suiza hay cuatro cantones mutuamente vecinos: Solothurn ocupa el centro de esta configuración, y está rodeado por Aargau, Basilea y Berna.) Esta situación suscita una intrigante pregunta: ¿Es posible colorear los 49 estados con tres tintas, en lugar de cuatro?

Tal posibilidad ha sido enfocada de otro modo en el Four Color Puzzle Game, puesto a la venta el año pasado por Knots, Inc., (2425 Third Street, San Francisco, Calif. 94107). Los compradores del juego (que cuesta 6,95 dólares contra reembolso) reciben dos colecciones de piezas de rompecabezas del mapa de la parte continental de los Estados Unidos. En cada una de ellas cada estado está recortado de una pieza; las dos piezas correspondientes a un mismo estado son de distinto color. (Lo mismo que en el teorema de los cuatro colores, estados de un mismo color pueden tocarse en un punto.) Volvamos a enunciar nuestra pregunta, ¿sería posible que Knots Inc. hubiera podido utilizar solamente tres colores para las piezas de su rompecabezas, y pedir entonces construir un mapa tricolor de los Estados Unidos?

La respuesta es negativa, pero a casi todo el mundo le resulta insoportablemente difícil demostrarlo. ¿Sabría el lector dar una demostración sencilla de que el mapa de los Estados Unidos requiere inevitablemente cuatro colores? Daré una el mes que viene.

El primero de los problemas propuestos el mes pasado consistía en intercambiar las posiciones de las dos piezas blancas y las dos piezas negras, realizando el mínimo de jugadas. Tal número mínimo resulta ser 16. Numerando de 1 a 8 los cuadros negros del minitablero, como se indicó el mes pasado, las cuatro primeras jugadas han de ser 2-4, 8-5, 4-6 y 5-4. El quinto movimiento puede ser 1-3 o 6-8; después hay muchas variantes posibles. Una de las típicas series de los 12 últimos movimientos es 1-3, 4-1, 6-8, 7-5, 8-6, 5-4, 3-5, 4-2, 5-7, 1-3, 6-8 y 3-1.

Las blancas pueden ganar la apuesta engañabobos que dimos el mes pasado de la forma siguiente:

Negras	*Blancas*
19-24	29-25
24-28	30-26
21-30	31-27
30-32	

En este punto el juego concluye, y aunque el bando negro ha ganado la partida, no ha conseguido coronar el peón que movió en primer lugar, perdiendo entonces la apuesta.

Finalmente, la ilustración de esta página, muestra una posición del juego de damas donde el Blanco tiene dos damas contra una del Negro, y además es el primero en mover. Jugando convenientemente, las Negras pueden forzar tablas. Esta posición es la única donde una dama puede conseguir tablas frente a dos.

En la página 111 del número de enero de este año, se presentó una solución del problema de hallar el cuadrado máximo que puede ser inscrito en un pentágono regular, problema propuesto en diciembre del año pasado. No se dio, sin embargo, la explicación correspondiente. Puesto que la más leve inclinación del cuadrado del lado izquierdo hará salir del pentágono alguno de sus vértices, es fácil imaginar que éste es el máximo. La solución correcta, en cambio, es la que se ve a la derecha. Suponiendo que el lado del pentágono sea igual a 1, el cuadrado de la izquierda tendrá lado 1.0605 +, mientras que el de la izquierda lo tendrá de longitud 1.0607 +. Notemos que el vértice inferior del cuadrado derecho no alcanza a tocar la base del pentágono. La ilustración está basada en una figura publicada en el *Journal of Recreational Mathematics* (vol. 3, n.º 4, páginas 232-233; octubre de 1970), donde Fitch Cheney resolvió el problema, que él mismo había propuesto en un número anterior.

Son muchos los lectores, de América y de España, que me han escrito sobre el "problema imposible" propuesto y resuelto en esta sección del mes de enero. Y señalan vicios de origen para que fuera literalmente imposible. Al dar una cota superior de 20 para los dos números seleccionados, la solución se hacía del todo inaplicable. Me he enterado de que el problema, con su correcta cota superior en 100, fue presentado por primera vez por David J. Sprows a la revista *Mathematics Magazine*, en donde apareció en su número de marzo de 1976 (vol. 49, número 2, página 96). Una solución pormenorizada del mismo salió en el mes de noviembre de 1977 (vol. 50, número 5, página 268). Richard Hess y Thomas Truscott fueron los dos primeros en enviarme sendas demostraciones de que la cota mínima superior puesta en 62 permite una solución. Me ocuparé con más detalle de este problema en una próxima colaboración.

Taller y laboratorio

Sistemas para construir hologramas y ver el comportamiento de los fluidos

Jearl Walker

Se han empleado muchas técnicas para hacer hologramas, esas llamativas fotografías tridimensionales que dan al observador el mismo sentido de paralaje y profundidad que despertaría la visión de la escena real. John Osborne y Bob Waterman, del South London Science Center, acaban de remitirme un montaje nuevo. Dicha técnica, la más sencilla que conozco, es, además, muy poco sensible a las vibraciones, que enturbian otros métodos de construcción de hologramas.

Las fotografías convencionales graban la luz dispersada por un objeto y enfocada sobre un rollo de película. El resultado es una imagen plana sin profundidad aparente. Los hologramas se distinguen porque no registran la imagen enfocada de un objeto, sino la interferencia entre la luz dispersada por el objeto y parte de la luz directa procedente de la fuente de iluminación del mismo.

En el proceso básico de construcción de hologramas, la luz de un láser se parte en dos haces por una placa de vidrio parcialmente reflectante; un haz resulta de la transmisión de la luz a través de la placa y el otro de la reflexión de la luz en su superficie. Uno de los haces ilumina directamente una película, el otro se dispersa a partir del objeto que estamos fotografiando. Parte de la luz dispersada ilumina también la película interfiriendo la iluminación directa. La película está, por tanto, expuesta a los componentes claros y oscuros de la interferencia, que en su mayoría son demasiado finos para que el ojo humano pueda verlos directamente.

Una vez revelada la película, puede reconstruirse la interferencia poniéndola en el haz de un láser. Cuando se ve la película iluminada así, la figura de interferencia crea una imagen del objeto fotografiado; la imagen es virtual, ya que su existencia es ilusoria, dependiendo totalmente de los ojos del observador para focalizar los rayos de luz procedentes de la película. La ilusión puede ser convincente porque el paralaje y la profundidad en la escena original se mantienen de una manera fiel. Cuando se examina la película desde una perspectiva ligeramente distinta, los ojos captan una parte algo distinta de la figura de interferencia, y, por tanto, se aprecia una perspectiva algo diferente de la imagen virtual, exactamente como si el objeto estuviera allí en realidad.

Para construir un holograma se necesitan varias lentes, una placa de vidrio parcialmente reflectante y una plataforma resistente. El conjunto del láser y los componentes ópticos debe estar lo más libre de vibraciones posible mientras se realiza la exposición, pues de no ser así la interferencia aparecerá borrosa en la película. La gente que se dedica a investigar con hologramas recurre a menudo a montajes complicados para anular las vibraciones de su equipo.

Osborne y Waterman han eliminado la necesidad de lentes y placas de vidrio por medio de una inteligente colocación del haz láser y una gota o una bolita brillante de mercurio. El láser se monta en un trípode de forma que el haz enfoque, desde arriba, hacia la bolita de mercurio, colocada en una pequeña plataforma sobre el suelo. (El hecho de que el aparato ocupe poco sitio en el suelo contribuye a la ausencia relativa de vibración.) El objeto que va a ser fotografiado se instala cerca de la bolita de mercurio, después de lo cual se coloca un cilindro de cartón o plástico sobre el conjunto total. En un lado del cilindro, un poco por encima del nivel del objeto, está la película a impresionar.

El láser ilumina la bolita de mercurio, que envía parte de la luz directamente a la película y parte al objeto que va a fotografiarse. Parte de la luz dispersada por el objeto impresiona también la película e interfiere la iluminación directa de la película. Una vez que se ha revelado la película, ésta es un holograma del objeto fotografiado.

Para ver el holograma se monta la película revelada en una apertura cortada en la cara de otro cilindro. Este cilindro se coloca en torno a la bolita de mercurio como estaba el primero. Cuando el rayo ilumina de nuevo el mercurio, parte de la luz se refleja en la película; al recibir esta luz, el observador contempla una imagen virtual del objeto en algún lugar dentro del cilindro.

Se puede recrear la ilusión con casi cualquier superficie reflectante que se ponga en sustitución de la bolita. Así, con un trozo de tiza o papel blanco, que

Haz procedente del láser helio-neon
Cubierta protectora
Película montada en el interior del tubo
Luz dispersada
Objeto a ser fotografiado
Luz directa
Tubo de cartón o plástico
Gota de mercurio

Montaje con el que John Osborne y Bob Waterman construyen sus hologramas

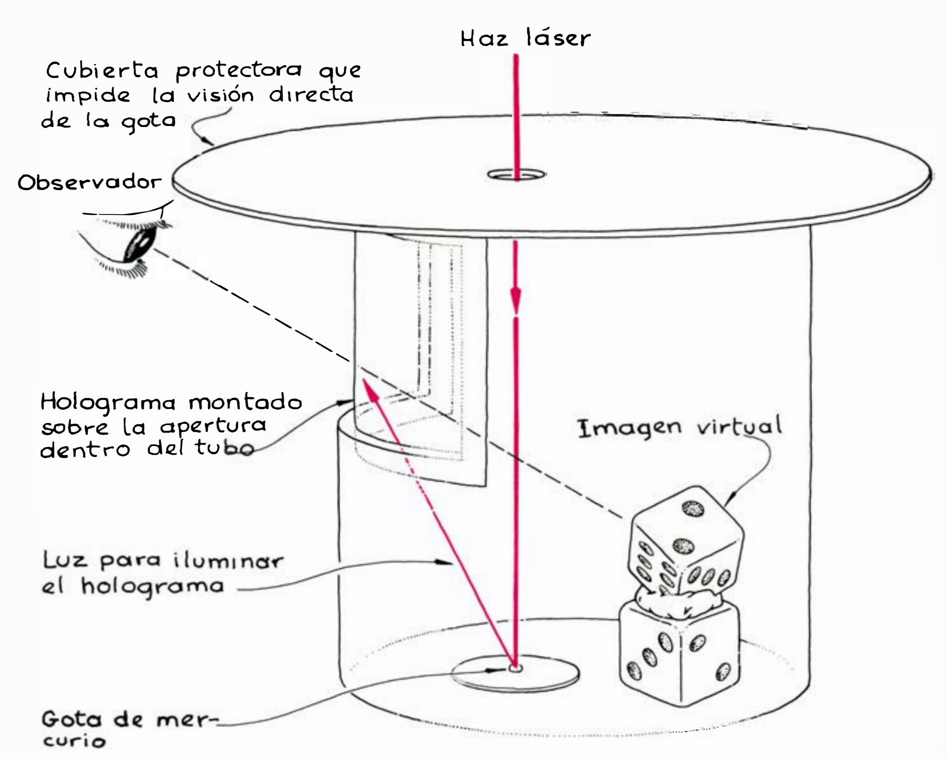
reflejarán luz suficiente para permitirle al observador ver la imagen virtual. Se puede incluso eliminar el láser, introduciendo una pequeña lámpara blanca en el punto en el que normalmente se pone la bolita. (El láser, por supuesto, es necesario de todas formas para hacer el holograma.) Con la lámpara, el holograma se coloreará, con la misma nitidez con que lo sería con la luz monocromática del láser. Los diferentes colores de la luz blanca crearán, cada uno, una imagen holográfica ligeramente corrida en el campo de visión del observador. Se puede evitar en parte que la imagen aparezca borrosa si el observador la mira a través de un filtro coloreado que elimine todos los colores menos uno.

Por fuente de luz blanca Osborne y Waterman emplean una bombilla tipo flash de 2 volt, miniatura. La lámpara, provista de un filamento pequeño, resulta adecuada como fuente puntual de luz para reemplazar la fuente original de luz láser procedente de la bolita de mercurio. El extremo de la lente de la lámpara se ennegrece de suerte que emita luz únicamente desde los lados.

No tiene por qué ser muy potente el láser de helio-neón utilizado para realizar la exposición. Sin embargo, cuanto más potente sea, más podrá acortarse el tiempo de exposición y así se reducirán los problemas planteados por las vibraciones. Osborne y Waterman utilizan un láser con una potencia no superior a los 0,7 miliwatt, que está entre los más potentes de los empleados en los laboratorios de enseñanza superior y formación profesional.

El láser se deja en funcionamiento mientras preparamos la exposición de la película; se bloquea el haz mediante un obturador de una cámara fotográfica vieja. Terminados los preparativos, se dispara el obturador por medio de un cable con el fin de evitar la vibración del aparato. Una velocidad típica de exposición es 0,3 segundos. Se puede sustituir el disparador por una tarjeta, pero la exposición resultaría entonces algo menos fiel.

Esta técnica de hacer hologramas tiene cuatro inconvenientes. Primero: el objeto debe estar próximo a la bolita y a la película y, por tanto, sólo pueden tomarse fotografías desde muy de cerca. Segundo: dado que la luz se dispersa hacia arriba, hacia el objeto y la película, la disposición produce una imagen con el aspecto de una foto a la luz de las candilejas. Tercero: es difícil el ajuste óptimo de la intensidad de la luz directa y la dispersada. El incremento de la intensidad de una implica necesariamente la reducción de la intensidad de la otra.



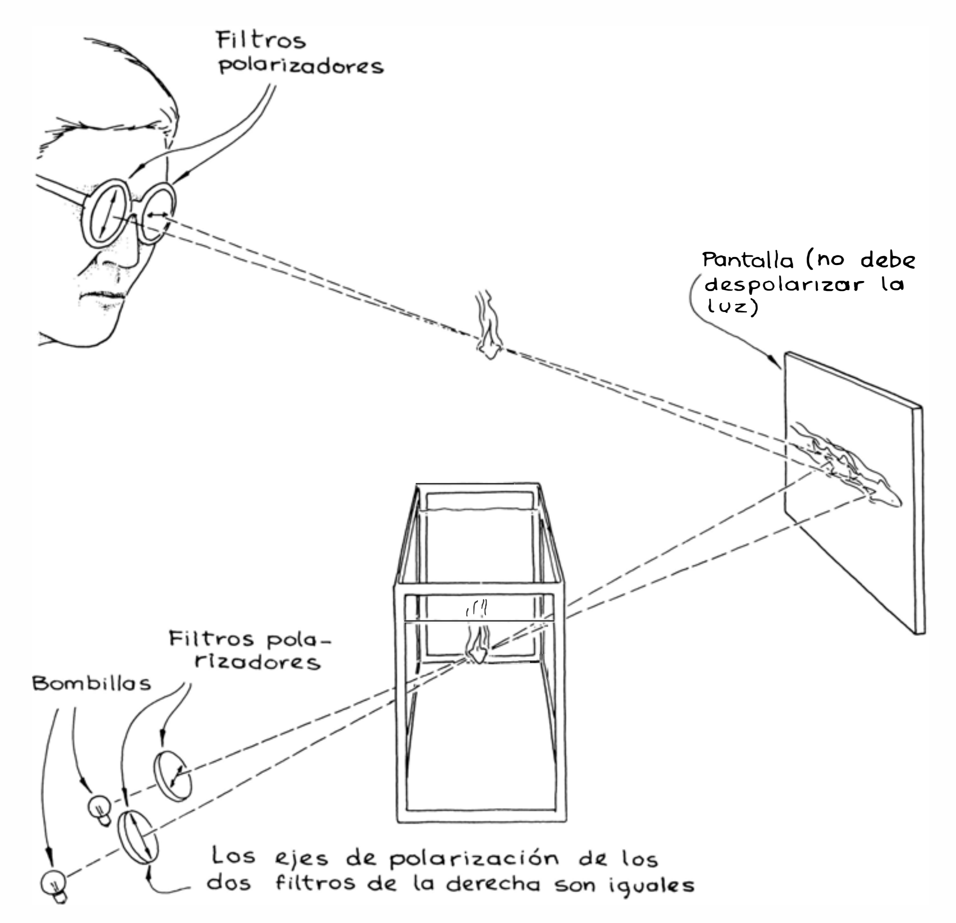
Cómo ver el holograma

Idealmente ambas deberían tener parecidas intensidades en la película, de forma que se produjera una interferencia de buena calidad. Y, por último: la mayor parte de la luz reflejada por la bolita se dirige hacia arriba y, en consecuencia, se pierde.

La bolita de mercurio debería medir unos 1,8 milímetros de diámetro. El mercurio limpio se puede sacar de un termómetro, calentándolo y recogiéndolo en una cavidad formada con un trozo de plástico. Cuando no se esté usando el mercurio, deberemos protegerlo del polvo para que conserve su brillo. No obstante lo dicho anteriormente, el tamaño óptimo de la gota sólo podrá determinarse en el curso de varios experimentos. El proceso a seguir estriba en conseguir las intensidades de luz en el nivel de la película que produzcan la interferencia adecuada. Podemos recurrir a una bolita de mercurio mayor para iluminar un holograma revelado, pues entonces no será necesario dividir la luz para iluminar el objeto.



Par de dados y su imagen holográfica



Montaje de McCutchen para proyectar una sombra

El sitio ideal de experimentación será el suelo de cemento de un sótano, pues los pisos superiores se hallan más expuestos a las vibraciones. Algunas personas que se adentran en este tipo de ensayos colocan su equipo en una caja de arena, montado en tubos interiores. La gran masa de arena frena las vibraciones y los tubos interiores ayudan a aislar el experimento de las vibraciones de la habitación.

Además de amortiguar las vibraciones, se debe tratar de evitar que las corrientes de convección y el propio aliento pasen a través del cilindro durante la preparación; unas y otro pueden crear variaciones en el índice de refracción del aire del interior del cilindro. Estas variaciones originarían, a su vez, otras variaciones en la figura de interferencia de la película y, por tanto, el holograma se vería borroso.

Osborne y Waterman prefieren hacer sus experimentos con película Agfa-Gevaert 10E75AH (35 por 31 milímetros), pero se puede sustituir por otros tipos, incluyendo el 8E75AH y el 20E75AH. La película se revela con el revelador Agfa G3p durante cinco minutos a una temperatura de 20 grados Celsius. El fijador, el normal para las fotografías en blanco y negro, necesita otros cinco.

Una vez instalado el aparato y nos hallemos ya dispuestos a construir un holograma, el primer paso será comprobar que se tiene la iluminación adecuada al nivel de la película. Esta puede comprobarse con un trozo de papel traslúcido montado en sustitución de la película y examinando la iluminación reflejada por la bolita de mercurio y por el objeto que va a ser fotografiado. Si la iluminación no es uniforme, se puede intentar conseguirla con una bolita de tamaño diferente (quizás otra más pequeña) o girándola en el haz láser.

Cuando la iluminación parezca ser óptima, se quita el papel fraslúcido, se bloquea el láser con un obturador o una tarjeta, se apaga la luz de la habitación, se saca la película del cartucho y se monta en el soporte de la misma en el cilindro que rodea el aparato. Después de la exposición se revela la película, se seca y se examina luego en el dispositivo para completar el holograma. Se conseguirá una buena exposición sólo después de experimentar con la iluminación y la obturación del láser. Conviene intentar conseguir un ligero oscurecimiento de la película.

El holograma debería registrar la mayor parte posible del objeto. Osborne y Waterman han fotografiado una cabrita de juguete. Cuando se ve el holograma, la imagen de la cabra se puede invertir, girando el cilindro que sostiene el holograma o moviendo la cabeza alrededor del cilindro. Se puede ver primero a la cabra de cara, después de perfil y, por último, de espaldas.

El haz láser puede ser peligroso, en especial si incide directamente sobre el ojo. Osborne y Waterman han tomado sendas precauciones para evitar que el observador vea la bolita de mercurio iluminada por la luz láser. Sobre el extremo superior del cilindro colocan una lámina de cartulina con un agujerito perforado en su centro que permita el paso del haz láser. En consecuencia, aunque dirijamos la mirada hacia el interior del cilindro, no veremos la bolita brillante. Como segunda precaución procuran que esa cartulina sea lo suficientemente extensa para que el observador no reciba luz directa de la bolita cuando esté mirando la imagen producida por el holograma.

Las técnicas experimentales para poner de manifiesto el flujo de un fluido han constituido desde siempre un desafío. Generalmente se emplean finos chorros de colorantes o pequeños trazadores de ciertos tipos. Dichas técnicas suelen ser toscas y de difícil interpretación, en especial cuando el flujo es turbulento. Si el objeto que se desea estudiar es un pez nadando, las mencionadas técnicas resultan poco menos que inviables. ¿Cómo hacer que el pez se esté quieto antes de introducir el trazador y que luego, a una indicación del experimentador, se mueva durante un breve intervalo de tiempo? Si se emplean múltiples marcadores, la estela dejada por el pez puede ser tan complicada que el observador necesitaría la ayuda de un computador para descifrarla.

C. W. McCutchen, del National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases, ha ideado un nuevo sistema para subsanar estos problemas. Su sistema proporciona tan sólo la información precisa para que el observador interprete fácilmente los movimientos del fluido. No necesita el auxilio de los confusos colorantes o de pequeños marcadores, y lo mejor de todo, un espécimen vivo no ha de esperar la señal del experimentador para ponerse a nadar.

El sistema en cuestión se basa en el empleo de luz polarizada procedente de fuentes puntuales para crear una sombra del espécimen y de la estela que deja a su paso. Debe iluminarse el acuario con dos lámparas. Frente a cada una de ellas está montado un filtro polarizador de forma que los haces de ambas lámpa-

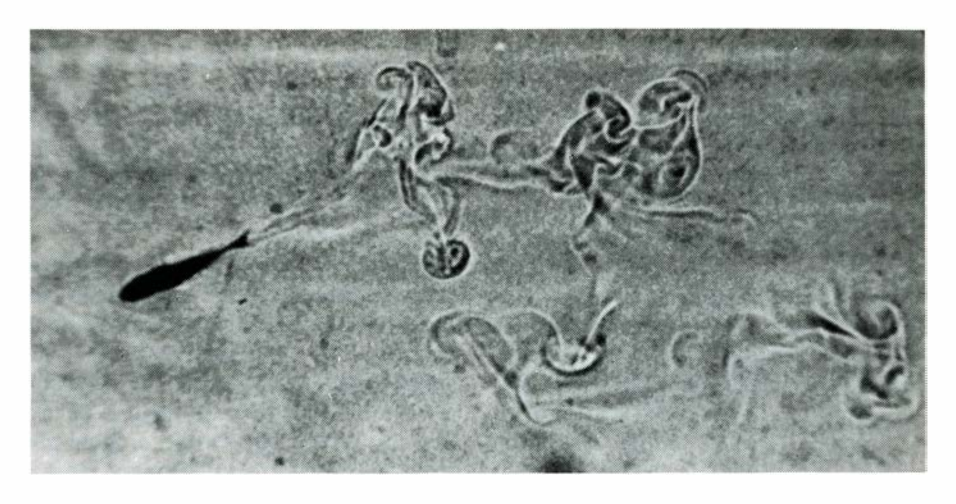
ras queden polarizados perpendicularmente, uno respecto al otro. La estrategia consiste en proyectar dos sombras del espécimen sobre una pantalla colocada detrás del acuario. El observador examina las sombras a través de unas gafas polarizadoras especiales cuyos ejes de polarización de ambas lentes son perpendiculares entre sí. Con las luces y las gafas adecuadamente orientadas, el ojo izquierdo sólo ve la sombra proyectada por la lámpara de la izquierda y el ojo derecho sólo la proyectada por la lámpara de la derecha. El cerebro combina estas dos imágenes para formar una figura estereoscópica de las sombras. Aunque tales sombras sean planas sobre la pantalla, la sombra estereoscópica compuesta muestra el paralaje ordinario y da así la impresión de profundidad.

La estela dejada por un pez no proyecta una sombra ordinaria debido a que el agua es transparente. Para crear una sombra del flujo de fluido, McCutchen empieza introduciendo un gradiente vertical de temperatura en el agua. Cuando un pez se mueve a través del agua térmicamente estratificada, la estela deja regiones con bruscos contrastes térmicos. La luz que atraviesa estas zonas se refracta y, como resultado de ello, la estela produce sobre la pantalla una sombra que consiste en una serie de líneas brillantes y obscuras. Cada lámpara produce una sombra de la estela. El sistema visual funde las dos imágenes y suministra la información suficiente para que el observador contemple una imagen de la estela totalmente tridimensional. Este método no exige que el pez se detenga a la espera de una señal del observador.

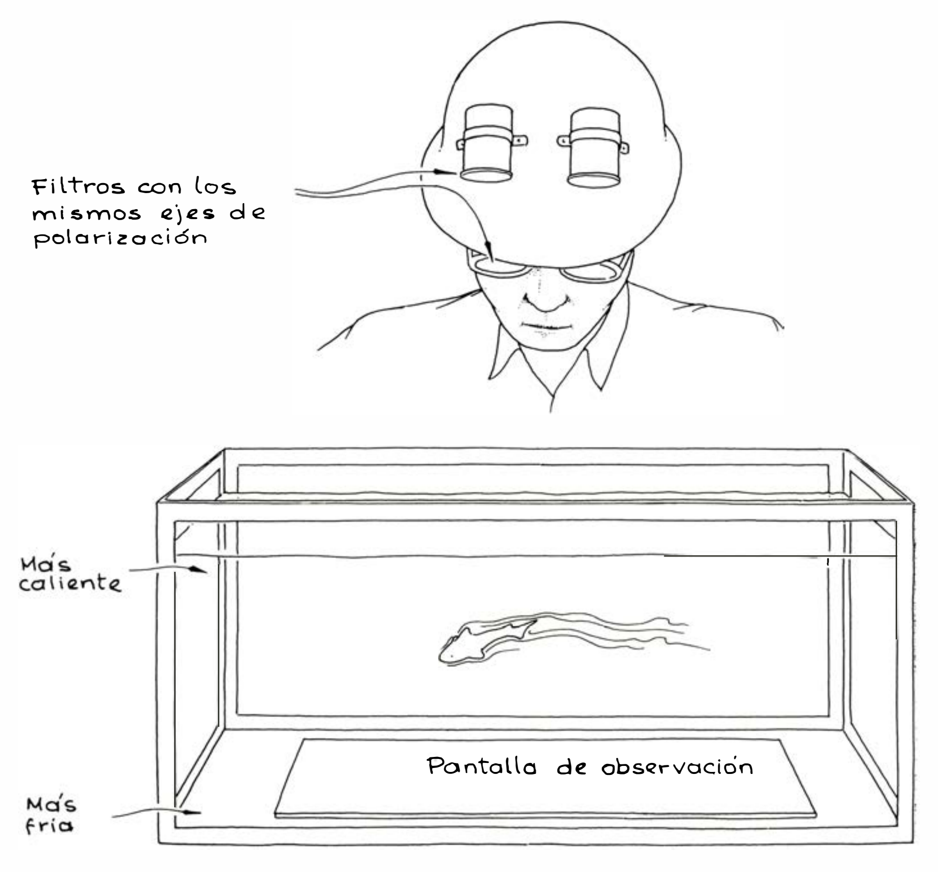
El experimento sólo requiere un suave gradiente de temperatura (uno o dos grados Celsius por centímetro). No es necesario que tal gradiente sea lineal, aunque debe extenderse hasta el fondo del agua del acuario. El sistema de McCutchen para obtener un flujo continuo de agua a través del acuario implica la adición de agua caliente por la parte superior y de agua fría por la inferior. El agua sale por la zona media lateral. Se fijan esponjas en las entradas para evitar que el agua entrante se mezcle con el agua del acuario y se destruya el gradiente de temperatura. Tampoco es imprescindible este constante fluir del agua, pero sin el flujo el experimentador dispone tan sólo de unos minutos antes de que el proceso de difusión destruya el gradiente de temperatura. Sin embargo, éste puede ser tiempo suficiente para un sencillo experimento o para observar un pez.

Para facilitar la observación, podemos montar los filtros polarizadores y las lámparas sobre un casco. Así se conserva el montaje óptico adecuado, aun cuando el observador se mueva para cambiar de perspectiva. Se emplean lámparas de microscopio de 6 volt, montadas a unos diez centímetros de distancia una de otra. Separaciones todavía mayores potencian la ilusión de profundidad. Aunque el observador está viendo también el objeto real, éste es ignorado rápidamente en aras de las sombras. (Debido a que estamos trabajando con agua, alimente las lámparas con una batería que no esté en absoluto conectada a la red eléctrica.)

La pantalla no debe despolarizar la luz; de lo contrario, ambos ojos verían las dos sombras. McCutchen emplea el lado mate de una hoja de aluminio, montada con la parte más larga paralela a una línea que uniera los ojos del observador. Tal sistema proporciona usualmente imágenes de las sombras de intensidades parecidas, facilitando de esta forma la ilusión estereoscópica. Tambien podrían servir otros metales con un acabado mate, superficies cubier-



"Sombrografía" de un pez nadando a propulsión



Lámparas y filtros polarizadores montados en un casco

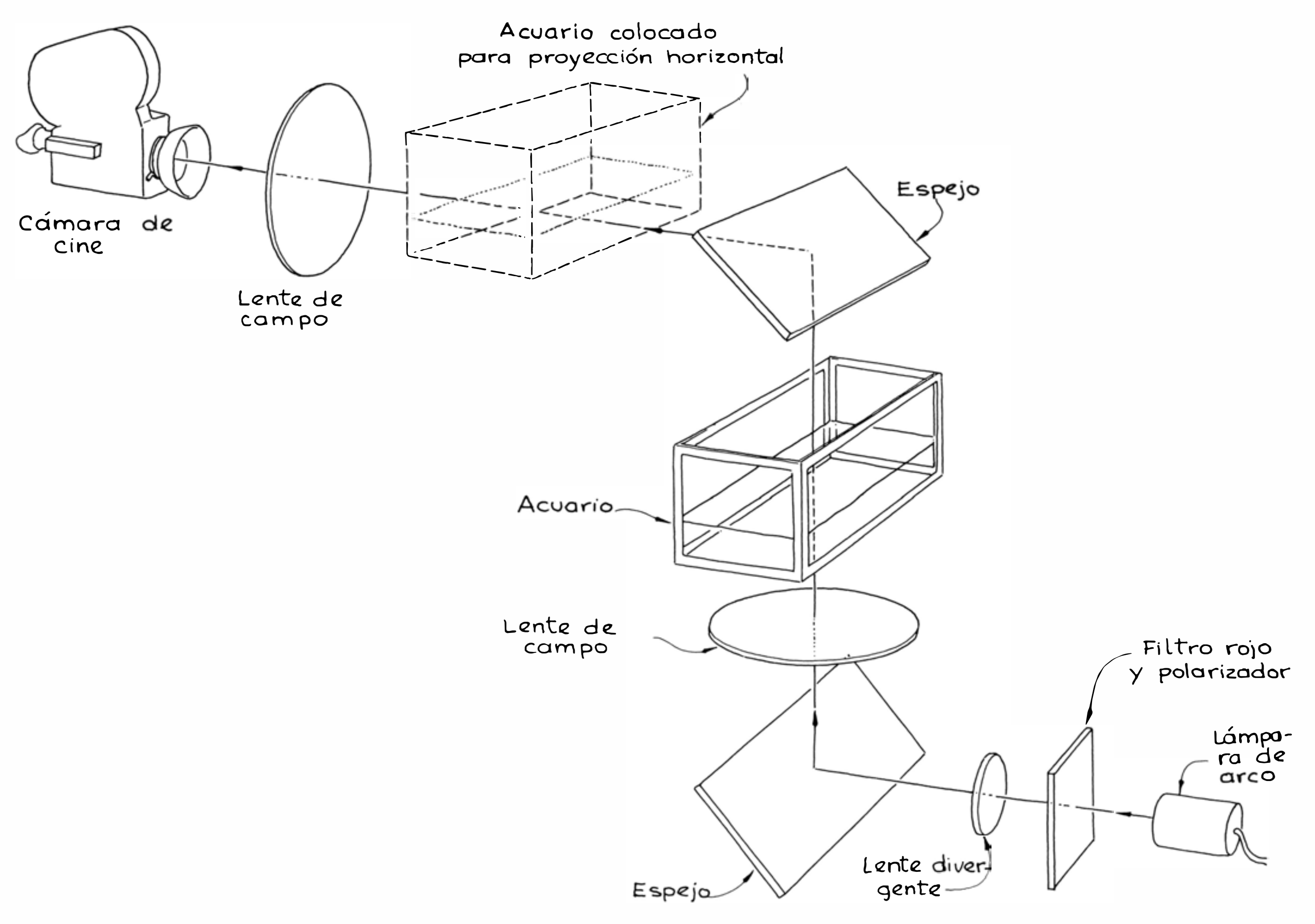
tas con pintura de aluminio y pantallas de cristal esmerilado. McCutchen ha montado su lámina de aluminio sobre un marco de madera a modo de bastidor. Cuando el conjunto se sumerge en el agua la madera se hincha, dejando el aluminio tirante. La pantalla puede ser vertical (para facilitar la visión horizontal del espécimen) o estar colocada en el fondo (para lograr una visión desde lo alto). Las olas de la superficie pueden distorsionar los resultados en este último montaje. Para evitar ese inconveniente, McCutchen hace flotar una lámina de plástico transparente sobre la superficie del agua por medio de piezas de styrofoam.

El tiempo durante el que persistirá la estela depende de dos factores: las fuerzas convectivas que actúan sobre el agua de las distintas zonas de la estela y el ritmo de conducción de calor entre estas zonas. Las fuerzas de convección se deben a la dependencia de la densidad del agua con la temperatura. El agua fría es más densa que la caliente y se hunde en ella. Con un gradiente de temperatura de alrededor de un grado Celsius por centímetro, una estela permanecerá durante unos 15 segundos. Pasado este tiempo, los bruscos contrastes térmicos en la estela se han suavizado debido al hundimiento y a la elevación de distintas regiones del agua y al intercambio de calor entre las zonas que están a diferente temperatura.

Muchos de los problemas de aerodinámica clásica pueden investigarse con el sistema de McCutchen. Por ejemplo, una pequeña ala dibuja a través de los estratos del agua un vórtice visible similar al ideal descrito en la mayoría de textos. Los anillos del vórtice, al igual que los anillos de humo, pueden crearse con la ayuda de un recipiente cilíndrico de plástico que tenga un pequeño agujero circular perforado en su fondo. Llenando el recipiente con agua caliente, o fría, y presionándolo con rapidez, se formará un bonito anillo de vorticidad. Con varios chorros, o con muchos agujeros, será posible obtener anillos de vorticidad que interaccionen mutuamente.

McCutchen empleó su montaje para el estudio del movimiento de un pequeño pez, un danio cebra (*Brachydanio rerio*), que mide unos tres centímetros de longitud. El estudio ha revelado una compleja variedad de mecanismos de propulsión, ninguno de los cuales parece ser muy eficiente. Tanto la propulsión principal como el mecanismo para cambiar de dirección proceden de un coletazo vigoroso, y breve, que va seguido de un período de deslizamiento. Durante el impulso, la extensión de las aletas dorsal y anal cambia sutilmente. Al inicio del coletazo ambas aletas están extendidas, pero durante el golpe de retorno las aletas en cuestión están menos extendidas. Cuando el pez comienza a deslizarse después de un coletazo, todas las aletas están plegadas; se van abriendo a medida que el pez frena su marcha. Por lo general, la detención brusca se ejecuta mediante las aletas pectorales, pero a veces el pez echa una pequeña cantidad de agua por la boca para aumentar el efecto de frenado. Cuando el pez permanece inmóvil, mantiene su posición creando una débil corriente descendente de agua con las aletas pectorales y con la cola.

Estos movimientos y otros más se manifiestan en las imágenes de las sombras, pero son demasiado rápidos para



Montaje óptico necesario para fotografiar la estela de un pez

seguirlos a simple vista. A fin de retardar el movimiento y obtener también una grabación permanente, McCutchen sacrifica la profundidad en las imágenes de las sombras y fotografía la sombra proyectada por una única luz. El montaje aparece en la ilustración de la página 122. Una lente de gran diámetro (lente de campo) envía un haz de luz paralelo a través del acuario. Otra lente similar focaliza la luz hacia una cámara tomavistas. La cámara está enfocada aproximadamente a la mitad de la distancia a la lente, no sobre el acuario. McCutchen afirma que este enfoque aumenta la sensibilidad de la cámara a las pequeñas discrepancias en la refracción de la luz que atraviesa la estela. Se inserta un filtro rojo en la trayectoria de la luz a fin de eliminar el problema de la aberración cromática de los objetivos de campo.

La cámara opera a unas 44 imágenes por segundo. McCutchen consiguió reducir la velocidad, paralizarla e invertirla, a pesar de lo cual el pez que estudiaba todavía se movía demasiado deprisa para que se pudieran captar los detalles de su desplazamiento. Es sorprendente lo poco que se sabe acerca de los mecanismos de propulsión de los peces, de manera que si al lector le interesan los experimentos de McCutchen podrán contribuir a un mejor conocimiento de dichos mecanismos.

Me han escrito algunos lectores hablándome de mi artículo sobre los líquidos no-newtonianos publicado en esta misma sección en enero de 1979. Un líquido no-newtoniano es una sustancia bastante rara que se caracteriza porque su viscosidad cambia cuando se agita y remueve el fluido. Los líquidos newtonianos, como el agua, se comportan de otra manera.

Entre la correspondencia recibida estaba la carta que me escribió I. Slabicky, de Newport, R.I. Me expone en ella cómo producir el efecto Kaye fácilmente. El efecto es un curioso salto de una parte del fluido viscoelástico al verterlo en un recipiente del mismo fluido. Slabicky vertió un chorrito (de dos a cuatro milímetros de diámetro) de champú Agree en la palma de su mano desde una altura de unos 15 centímetros. Ajustando la altura y el grosor del chorro, descubrió cierta combinación que producía el efecto Kaye casi sin solución de continuidad, dando saltitos de hasta 25 milímetros.

Mary R. Hebrank, de la Universidad de Duke, me habló de los muchos e importantes fluidos biológicos que muestran características de líquidos no-newtonianos. Dentro de determinado intervalo de agitación, la sangre es no-newtoniana, hecho que puede ser importante para algunos aspectos de la circulación sanguínea en los seres humanos y otros animales. Se está investigando ya sobre los aspectos no-newtonianos del líquido sinovial, que lubrifica las articulaciones de los organismos vertebrados, y del mucus.

El mucus puede desempeñar un papel importante en la reducción del arrastre en algunos tipos de peces. Según algunas teorías, esta reducción del arrastre puede depender del comportamiento no-newtoniano del mucus (o limo) de la superficie del pez. Por ejemplo, cuando un pez tiene que nadar rápidamente, parte de su mucus corporal puede mezclarse con el agua que lo roza. A mayor velocidad de desplazamiento, la capa de agua próxima a la superficie del pez tiende a formar turbulencia, incrementando el arrastre. La adición de una pequeña cantidad de mucus al agua en turbulencia puede incrementar la viscosidad y, en consecuencia, reducir la turbulencia, de manera que el pez puede nadar más rápidamente.

Muchas de las demostraciones que he descrito pueden verse en una película, *Comportamiento reológico de los fluidos,* realizada por Hershel Markovitz, de la Carnegie-Mellon University. Dicha película es distribuida por la Encyclopaedia Britannica Educational Corporation e incluye varios experimentos interesantes hechos con líquidos coloreados en un fluido no-newtoniano que rodeaba a una esfera giratoria. Demuestra también muy claramente el efecto Weissenberg, en virtud del cual un líquido rotante sube por una varilla central en vez de hacerlo por la pared exterior del recipiente.

Barbara H. Shafer, de Greene, R.I., me escribió a propósito del extraño comportamiento de su pulpa de nuez. Ella acostumbra a prepararla la víspera de un día de fiesta y la congela. A medida que la va cocinando, ésta no muestra señales de tener mucha agua, pero cuando se descongela aparece una abundante cantidad de líquido por encima. Calienta entonces el recipiente al baño maría, pero ni siquiera entonces se reabsorbe. Así pues, justo antes de servir la pulpa la bate y cuanto más fuerte lo hace, más espesa se pone. El batido parece incrementar la viscosidad. Shafter duda que todas las pulpas se comporten de esta suerte, de manera que si el lector quiere repetir su experimento, podría hacerlo con otros tipos de pulpa.

Libros

Introducción a la zoogeografía, problemas de la ingesta y un clásico de la ecología americana

Jacinto Nadal, M. Alemany y Miguel Morey

INTRODUCCION A LA ZOOGEOGRAFIA, por Paul Müller, traducción de la edición inglesa (1974) por Diorki traductores; 232 págs. 107 figuras (fotografías). Editorial Blume, 1979. Los estudios zoogeográficos se iniciaron con gran empuje una vez aceptadas plenamente las teorías evolutivas que intentan explicar el origen de los diferentes grupos taxonómicos que se distinguen en el reino animal. Según este criterio, la distribución geográfica de un animal dependía fundamentalmente de razones históricas de origen. Son muchas las pruebas que en este sentido ha aportado la zoogeografía; quizás una de las más clásicas sea la que, atendiendo al número de hileras dentarias y a la distribución de los Ciprínidos (China e India, Siberia, Europa y América del Norte) concluye que el origen de esta familia de peces fue Asia Meridional. Sin embargo, la presencia o ausencia de un animal en un lugar determinado no se debe exclusivamente a razones de tipo histórico; es lógico que intervengan otros factores como los de índole ecológica y genética.

Uno de los méritos del libro, que queda reflejado en su título, es la sencillez que el autor ha querido darle, al mismo tiempo que suministra al lector la fuente de nuevos conocimientos a través de una amplia bibliografía a la que hace referencia a lo largo del texto. En el capítulo zoogeografía y biogeografía juzga y compara dichos conceptos, al mismo tiempo que analiza las subdivisiones de la zoogeografía tanto en los aspectos doctrinales como espaciales: marina, de aguas continentales y terrestre. En el capítulo dos, sobre "La Biosfera", estudia los factores limitantes para la aparición de seres vivos considerando los diferentes biotopos que existen. Está este capítulo, como todo el libro, lleno de ejemplos que indican hasta qué punto son los organismos capaces de explotar los medios más hostiles.

"El área de distribución y su dinámica" es el título del capítulo tercero; en él se desarrolla alguno de los conceptos básicos en los estudios zoogeográficos como son la distribución espacial de la especie, barreras naturales, efecto de las glaciaciones, áreas relictas, migraciones y el efecto del hombre que, como manifiesta, ya existía desde antiguo pero que es cada vez más acusado, en ocasiones limitando el área de distribución de una especie al modificar el medio, en otras, en cambio, introduciendo nuevas especies, lo que suele acarrear en la mayoría de los casos serios transtornos para la fauna autóctona.

El capítulo cuarto, "Los reinos zoogeográficos", trata de la distribución de los animales en los diferentes continentes. Estos estudios condujeron durante el siglo pasado al establecimiento de los denominados reinos zoogeográficos, utilizando categorías sistemáticas a nivel de familia y género. Se nos explica en qué reinos fue dividida la biosfera por primera vez y cómo paulatinamente se ha llegado a aceptar el criterio actual. El autor define los límites de los distintos reinos y regiones zoogeográficas, las especies que los caracterizan, aunque esto, como manifiesta, es complejo por el hecho de que ninguna especie posee una valencia ecológica que incluya todos los ambientes que existen en un reino, y expone también los problemas que se plantean en las zonas de mezcla y transición consideradas a veces como zonas propias si no tienen una barrera geográfica bien definida. Termina el capítulo con un resumen de las reglas zoogeográficas, reflejo de la asociación entre factores geográficos y climáticos y la diferenciación de los taxones.

En el capítulo quinto, sobre los biomas, discute el concepto de bioma, los distintos tipos existentes y las causas de su disposición geográfica. Cuando describe los distintos tipos de biomas, no se ciñe exclusivamente a sus características particulares, sino que compara su diversidad y productividad.

En los ríos y cursos de agua, objeto del capítulo sexto, analiza inicialmente sus condiciones fisicoquímicas, para entrar luego en especies indicadoras y en el efecto de vertidos en los cauces. Un séptimo capítulo se dedica a lagos y estanques, ocupándose del estudio de los ecosistemas acuáticos y de los procesos funcionales en el hábitat dulceacuícola. En el octavo, referido a los ecosistemas urbanos, considera a la ciudad industrial como un ecosistema donde el hombre es la especie clave, destacándose la interdependencia que hay entre economía y ecología. Analiza cómo la emisión de humos provoca la formación de una capa que limita la radiación del calor emitido en la ciudad, por lo que la temperatura del medio urbano siempre es más alta que la de su entorno. Son más frecuentes sus nieblas, ya que el polvo actúa de núcleo de condensación; en cambio, las lluvias son más escasas ya que su aire no llega a almacenar agua en cantidad suficiente en razón de la rapidez con que se desprende. Trata de las diferencias registradas en la fauna, poniendo de manifiesto tanto especies que se rarifican como otras cuyo número aumenta sensiblemente.

En el capítulo noveno, "Evolución del área de distribución", analiza la evolución histórica de las áreas de distribución, diferenciando áreas que han permanecido constantes durante mucho tiempo y otras que presentan un incesante y extraordinario dinamismo. Critica el gran número de puentes que se han ideado para justificar la actual distribución de algunas especies. Cita y comenta algunos de los puentes propuestos. Analiza los conocimientos geológicos actuales junto a las posibilidades de dispersión de las especies; sólo el estudio conjunto de ambos criterios permite que éstos sean significativos para la zoogeografía. En este capítulo trata también de los problemas de insularidad, para concluir valorando las posibilidades de desarrollo que se le ofrecen a la zoogeografía entendida como ciencia. El libro se

cierra con una extensa y documentada bibliografía (J. N.)

ESTE ASUNTO DE LA NUTRICION, por John Yudkin, Antoni Bosch Editor, Barcelona 1979. Este es un auténtico libro de divulgación en el que encontramos un aceptable nivel de calidad y rigor expositivo al mismo tiempo que un lenguaje llano y directo que permitirá llegar al gran público, para el que el autor ha presentado esta introducción a la nutrición y a la bioquímica de los alimentos.

Considero que, en conjunto, el libro está bastante logrado como introducción y puede ser leído sin base previa tanto bioquímica como fisiológica; precisamente debido a ello, el libro ha de empezar desde muy atrás, desde la descripción de tipos y funciones de los principales componentes del organismo, para acto seguido introducirnos en sus orígenes en los alimentos y en la composición y funciones de los mismos.

El libro empieza con una larga presentación de los componentes bioquímicos del organismo y de los alimentos, siguiendo una serie de consideraciones acerca de los niveles de energía, metabolismo energético y la extraordinaria capacidad homeostática del organismo humano en lo referente a la regulación de sus necesidades a partir de dietas diversas. Por último, se incluye una parte, tal vez la más importante, en que trata con cierta profundidad y rigor una serie de problemas nutritivos que están presentes en la vida corriente y que nos afectan a prácticamente todos. Entre estos temas se incluye la disyuntiva entre pan blanco y pan moreno (integral), el azúcar y sus problemas –especialmente los derivados del enorme consumo propio de los países industrializados–, los aditivos y sus funciones en los alimentos, la obesidad y el exceso de consumo de alimentos y la incidencia de la dieta sobre algunas enfermedades, como la trombosis coronaria.

Un aspecto fundamental a lo largo de esta última parte del libro es la elevadísima dosis de sentido común que se observa en el tratamiento que hace el autor de algunos aspectos comunes de la dietética supuestamente "natural", y las agudas puntualizaciones que al respecto indica, especialmente el jocoso título de un capítulo en el que proclama que "La agricultura no es natural", para reducir al absurdo la no menos absurda –y extendida– idea de que algunos alimentos, ciertamente manufacturados industrialmente como el yoghourt, son más naturales que otros como el pan blanco.

El libro es especialmente útil en algunos simples aspectos cuantitativos, en los que nos demuestra con sencillos razonamientos la eficacia como alimento de algunos materiales despreciados por algunos dietetistas y la baja colaboración al monto total de alimentos ingeridos en la dieta diaria de algunos productos dietéticos o de régimen muy difundidos en nuestra sociedad. Un ejemplo muy interesante de los muchos que salpican el libro es aquel en que compara su almuerzo: tortilla de dos huevos, judías verdes, galleta, queso y un café con bastante leche con el de una muchacha "a régimen": yoghourt de frutas, tableta de chocolate y una coca-cola, indicando que en su caso ingería 410 calorías y la chica 480, con la diferencia de que la de ésta tenía una base muy poco equilibrada, constituida casi exclusivamente por glúcidos.

A lo largo del libro se presentan ejemplos, casos conocidos de primera mano y sobre todo observaciones de un profesional de la medicina sobre aspectos comunes de la dietética y la nutrición. No falta una importante dosis de fino humor y una gran vehemencia en la defensa de algunas posiciones muy concretas, especialmente en el caso de los alimentos "naturales" y el uso de aditivos y azúcar, fustigando sin piedad la charlatanería y el comercialismo que se ocultan en las modas relativas de utilización de alimentos "naturales" y alimentos de "régimen".

El uso de la primera persona en la narración acentúa ese intento de contactar con el público y de hacerle partícipe de sus ideas y posiciones. El libro resulta muy ameno, especialmente en su segunda mitad y aún más especialmente en los capítulos concretos que dedica a temas de interés cotidiano; esta parte resulta tal vez un poco corta para el lector, especialmente en comparación con la primera, aunque en conjunto el libro muestra una muy aceptable unidad.

El problema más importante que presenta el texto es su falta de adaptación concreta para el público español, ya que los hábitos alimentarios de los ingleses son en muchos aspectos bastante diferentes de las costumbres españolas; además, el consumo de productos "naturales" es aún relativamente nuevo por nuestras latitudes. Resultan especialmente inadecuadas sus anotaciones a propósito de la legislación británica sobre alimentos para regímenes de adelgazamiento y su larga discusión sobre la utilización de grasas animales (cuando aquí predominan las de tipo vegetal). La traducción contribuye algo a este distanciamiento por la no utilización de palabras que resultan ya comunes en nuestro lenguaje –como liofilización en lugar de secado por congelación acelerada–, así como la denominación, poco usual, de algunos componentes bioquímicos de la dieta.

Este es un buen libro de divulgación, aunque no un libro de nutrición sino sobre la nutrición; se echan en falta capítulos sobre algunos aspectos concretos de importancia dietética, como la malnutrición –aunque el tema se roza en algún capítulo, como el XXI– y los problemas dietéticos del consumo de bebidas alcohólicas y otros excitantes en los alimentos. También se observa una excesiva seguridad en la toma de algunas posiciones –como en el caso de las enfermedades coronarias, de las que acusa primordialmente al exceso de consumo de azúcar, absolviendo a las grasas–, mientras que adopta una postura mucho más ecléctica en algunos temas como el de los aditivos y realmente no toma posición definida en el caso de las causas de la obesidad.

En conjunto es una obra muy recomendable, no como libro de discusión y polémica en torno a algunos aspectos de la nutrición –como podría dar a entender la última parte–, sino como libro de divulgación sobre nutrición, campo este necesitado de clarificaciones, sentido común y puntos sobre las íes. (M. A.)

EL TEATRO ECOLOGICO Y EL DRAMA EVOLUTIVO. Por G. Evelyn Hutchinson. Versión española de Ramón Navarro. Editorial Blume. Barcelona. 151 páginas (1979). Bajo este ingenioso y sugestivo título, correspondiente al primero de los cuatro ensayos que contiene, aparece esta nueva obra de la colección Blume Ecología, como versión española de la original inglesa que causó bastante impacto cuando apareció en Estados Unidos hace ya catorce años. Su autor, G. Evelyn Hutchinson, está considerado como una de las figuras más importantes de la ecología moderna, maestro de muchos de los ecólogos americanos de mayor prestigio y actualidad. Partiendo de una formación esencialmente limnológica, Hutchinson se extiende hacia la ecología y la evolución y llega a traspasar los aspectos puramente científicos para incluir facetas humanísticas que le alejan del arquetipo superespecializado. Es, sin duda, este último rasgo de su personalidad el que justifica la aparición muy tardía de esta versión española, pues la obra conserva todo su frescor e interés, a pesar de estar ya superada en algunos puntos. Tratán-

dose de cuatro ensayos independientes sobre temas completamente distintos, la obra resulta desigual tanto en temática como en interés. Desde el punto de vista ecológico es indudablemente el primer ensayo el de mayor importancia, y más concretamente la segunda parte titulada "El nicho: un hipervolumen habitado abstractamente", que ha ejercido un poderoso influjo en el desarrollo de la ecología en los últimos años. Muy difícil de juzgar, en cambio, para un científico es el segundo ensayo "El naturalista como crítico de arte".

El ensayo que da principio al libro, "El teatro ecológico y el drama evolutivo" (90 páginas), consta de tres partes bien diferenciadas que constituyen pequeños ensayos independientes en cierto modo, ya que la primera trata del origen de la vida en nuestro planeta, además de algunas otras cuestiones de exobiología; la segunda da una visión bastante particular de la evolución actual de las especies y la tercera expone la evolución de los homínidos con el siempre interesante problema del origen de nuestra especie. Sin embargo, es indudable que los tres ensayos parciales tienen un nexo común que no es otro que el que da título al conjunto: que la evolución biológica es como una representación teatral que se desarrolla en el marco o escenario de la biosfera, ajustándose a las leyes de la ecología. Por tanto, las tres partes no son sino momentos muy concretos del apasionante drama, cuyo comienzo ocurre en un decorado muy distinto del actual; es decir, la vida conoce su origen en una tierra con atmósfera reductora (primera parte); y asistimos a dos escenas actuales: la competencia entre especies a través de la conquista de nichos ecológicos (segunda parte) y el comportamiento de nuestra propia especie respecto a las demás (tercera parte). Esa composición escenográfica enmarca una obra que, como puntualiza el propio autor, no sabemos qué desenlace tendrá, al menos en lo que atañe a la especie humana.

En la primera parte, titulada "La biosfera o volumen en el que los organismos viven realmente" (24 páginas), Hutchinson analiza en primer lugar la estructura y naturaleza de la biosfera, intentando delimitarla tanto en altitud como en profundidad, para pasar a plantearse el tema de la consideración de los seres vivos desde un punto de vista muy objetivo (por ejemplo, desde el punto de vista de un minerólogo), como hiciera ya Vernadsky y como haría posteriormente Monod en su conocida obra "El azar y la necesidad". Tras el estudio de las condritas carbonáceas, especialmente la de Orgueil (Francia), se plantea la posibilidad de la existencia de una biosfera en Marte para teorizar, finalmente, sobre las primeras etapas del desarrollo de la vida sobre la tierra, apuntando las pruebas obtenidas a partir de registros fósiles muy antiguos de que ya debió haber una competencia adaptativa entre aquellos seres primitivos, similar a la que se produce en la actualidad y de la que tenemos más elementos para su conocimiento. Esta parte sigue prácticamente vigente, a pesar de los modernos descubrimientos derivados de los datos aportados por los programas de investigación espacial.

La segunda parte del primer ensayo, "El nicho: un hipervolumen habitado abstractamente" (50 páginas), es sin duda el de mayor alcance de toda la obra. Aquí puede hablarse realmente de una teoría fecunda que informó ampliamente gran parte de la investigación ecológica posterior, sobre todo en los Estados Unidos. Partiendo del concepto de nicho propuesto en sus aspectos funcionales por Elton en 1934 y anteriormente por Grinnell en un sentido más espacial, equivalente al actual concepto de hábitat, así como de las ideas de Gause sobre exclusión por competencia, el autor desarrolla una teoría para la descripción y evaluación cuantitativa del nicho ecológico, concibiéndolo como un hipervolumen en un hiperespacio cuyas direcciones de variación son las variables más importantes en la vida de la especie, tales como por ejemplo las proporciones relativas de los diversos alimentos que consume, las condiciones ambientales apropiadas para su supervivencia, etc. Distingue, además, entre nicho fundamental, o nicho cubierto en ausencia de competidores, y nicho efectivo, o nicho que ocupa realmente cuando convive con otras especies competidoras y que siempre constituye una fracción del nicho fundamental. Seguidamente expone una serie de ejemplos concretos de diversificación de nichos, entre los que destacan el de las aves del género *Dendroica,* estudiado por Mac Arthur, donde la segregación de nichos parece deberse fundamentalmente al comportamiento, y el del género *Conus,* con seis especies adaptadas a distintos niveles de la zona intermareal por su resistencia a la exposición al aire, preferencia de substrato y hábitos y tendencias alimentarios. A continuación se plantea el problema de los tipos posibles de diversificación del nicho en relación con los mecanismos de especiación, analizando con cierto detalle la diversificación por especialización y adaptación espacial y por adaptación temporal. Tras la consideración del polimorfismo como fenómeno que permite a una especie aumentar el tamaño de su nicho y del caso de especies afines que presentan simbiosis en vez de competencia, aborda el problema global del significado de los nichos ecológicos en la comunidad, considerando la tendencia a la separación de nichos entre taxones afines como una contribución importante a la producción de diversidad y al aumento de estabilidad de las comunidades.

La tercera parte, "Prolegómenos al estudio del origen del hombre", la más corta (16 páginas), sigue teniendo interés en la actualidad. Comienza tratando al hombre simplemente como una especie animal, tal como haría años más tarde y a un nivel popular el conocido zoólogo Desmond Morris, para pasar inmediatamente a intentar definir el nicho ecológico humano. Naturalmente, el autor se enfrenta con el problema de las "singularidades" del hombre con respecto de las demás especies, entre las que destaca la adaptación cultural (sin implicaciones genéticas), de la que dice que ha llevado a una mayor diferenciación de nichos ecológicos de la que se da entre familias e incluso entre órdenes de mamíferos. Comenta la sustitución en la especie humana de los procesos de transmisión hereditaria de información por un proceso de transmisión cultural, tema que más tarde Margalef desarrollaría con mayor amplitud en su obra "Perspectivas de la teoría ecológica" que inauguró la colección a que pertenece la obra que comentamos, con sus ideas sobre los canales genético, ecológico y cultural de transmisión de información. Incluye asimismo unas breves apuntes sobre el origen del hombre, que han quedado bastante desfasados debido a los hallazgos de homínidos fósiles en la década pasada.

El breve ensayo titulado "El naturalista como crítico de arte" (12 páginas) es una reflexión lineal sobre el valor de los objetos naturales como obras de arte. Tras indicar que tan sólo hace siglo y medio que los museos de arte y de historia natural están separados, pues antiguamente solían encontrarse mezclados los objetos naturales y las creaciones estéticas, e incluso se usaban objetos naturales como conchas de moluscos o huevos de aves para la realización de objetos artísticos, intenta poner de relieve la extraordinaria belleza de numerosos objetos naturales, encontrando como explicación a su no inclusión en los museos de arte el que las reacciones artísticas

humanas no se valoran sólo por criterios estéticos, sino principalmente por el mensaje que ha querido transmitir el artista.

En el ensayo "Reconsideración del microcosmos lacustre" (11 páginas) se detiene en una serie de reflexiones sobre las ventajas de los estudios limnológicos respecto a otros campos biológicos para la solución de ciertos problemas de ecología general, fundando esta apreciación en razones de escalas de tiempo y espacio. En efecto, en los lagos la mayoría de los organismos son de ciclo vital muy corto, por lo cual el número de generaciones producidas en un solo año equivaldría a uno o varios milenios en la especie humana o en especies arbóreas. Y lo mismo podría decirse respecto a escalas espaciales. A continuación considera la gran complejidad del microcosmos lacustre, reflejada en la exuberante diversidad de nichos ecológicos en un reducido espacio, aportando su explicación a la famosa "paradoja del plancton". Las apostillas finales sobre la diversidad específica tienen un interés más relativo debido a los grandes avances modernos en este campo; pero son, en cambio, deliciosas las noticias históricas de limnología.

El último y más breve de los ensayos, "Lo mejor en la geómetra arlequín" (10 páginas), consiste en la narración minuciosa de la génesis de ciertos avances de la genética de los primeros años del presente siglo a través de la vida de un coleccionista y criador de mariposas sin muchos conocimientos de genética, el reverendo G. H. Raynor, el cual, con su afición a la cría de mariposas nocturnas y en particular de la geómetra arlequín (*Abraxas grossulariata*) por motivos al parecer más estéticos y hasta económicos que científicos, hizo posibles los importantes descubrimientos de Doncaster, precursor de la teoría cromosómica de la herencia, y de Onslow, uno de los fundadores de la genética bioquímica.

En conjunto, el libro está bien presentado, con una cubierta atractiva y siete láminas muy interesantes. Contiene, además, numerosas notas al pie de página, un índice sistemático de organismos y un índice general. La traducción está muy cuidada y si en algunos puntos el texto parece algo oscuro es que también es conceptista en el original. A mi juicio, la obra es muy enriquecedora a nivel científico y, sobre todo, a nivel cultural y puede ser muy aleccionadora para aquellos que tienen un sentido excesivamente tecnificado de la ciencia. Obras como ésta, en las que se aúna el rigor científico con la amenidad y el humanismo, deben ser siempre bien recibidas y su edición estimulada. (M. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ATRIBUCION DEL ESPECTRO RADIOELECTRICO

THE INVISIBLE RESOURCE: USE AND REGULATION OF THE RADIO SPECTRUM. Harvey J. Levin. The Johns Hopkins Press, 1971.

SPECIAL ISSUE ON SPECTRUM MANAGEMENT. *IEEE Transactions on electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-19, n.º 3; agosto, 1977.

ELEMENTOS GENETICOS TRANSPONIBLES

TRANSPOSABLE GENETIC ELEMENTS AND PLASMID EVOLUTION. Stanley N. Cohen en *Nature*, vol. 263, n.º 5580, págs. 731-738; 28 de octubre de 1976.

DNA INSERTION ELEMENTS, PLASMIDS AND EPISOMES. Dirigido por A. I. Bukhari, J. A. Shapiro y S. L. Adhya. Cold Spring Harbor Laboratory, 1977.

MOLECULAR MODEL FOR THE TRANSPOSITION AND REPLICATION OF BACTERIOPHAGE MU AND OTHER TRANSPOSABLE ELEMENTS. James A. Shapiro en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 76, n.º 4, págs. 1933-1937; abril, 1979.

LA ESCRITURA ZAPOTECA

SCULPTURE AND MURAL PAINTING OF OAXACA. Alfonso Caso en *Handbook of Middle American Indians*, dirigido por Robert Wauchope y Gordon R. Willey. University of Texas Press, 1965.

MONTE ALBÁN: SETTLEMENT PATTERNS AT THE ANCIENT ZAPOTEC CAPITAL. Dirigido por Richard E. Blanton. Academic Press, 1978.

THE CLOUD PEOPLE: EVOLUTION OF THE ZAPOTEC AND MIXTEC CIVILIZATIONS OF OAXACA, MEXICO. Dirigido por Kent V. Flannery y Joyce Marcus. University of New Mexico Press (en prensa).

OBSERVATORIO EINSTEIN DE RAYOS X

X-RAY-EMITTING DOUBLE STARS. Herbert Gursky y Edward P. J. van den Heuvel en *Scientific American*, vol. 232, n.º 3, págs. 24-35; marzo, 1975.

THE *EINSTEIN* (*HEAO 2*) X-RAY OBSERVATORY. R. Giacconi, G. Branduardi, U. Briel, A. Epstein, D. Fabricant, E. Feigelson, W. Forman, P. Gorenstein, J. Grindlay, H. Gursky, F. R. Harnden, Jr., J. P. Henry, C. Jones, E. Kellogg, D. Koch, S. Murray, E. Schreier, F. Seward, H. Tananbaum, K. Topka, L. Van Speybroeck, S. S. Holt, R. H. Becker, E. A. Boldt, P. J. Serlemitsos, G. Clark, C. Cañizares, T. Markert, R. Novick, D. Helfand y K. Long en *The Astrophysical Journal*, vol. 230, n.º 2, Parte 1, págs. 540-550; 1 de junio de 1979.

EL PARQUE DE YELLOWSTONE, VENTANA AL INTERIOR DE LA TIERRA

YELLOWSTONE HOT SPOT: NEW MAGNETIC AND SEISMIC EVIDENCE. R. B. Smith, R. T. Shuey, R. C. Friedline, R. M. Otis y L. B. Alley en *Geology*, vol. 2, n.º 9, págs. 451-455; septiembre, 1974.

MAGMA BENEATH YELLOWSTONE NATIONAL PARK. Gordon P. Eaton, Robert L. Christiansen, H. M. Iyer, Andrew M. Pitt, Don R. Mabey, H. Richard Blank, Jr., Isidore Zietz y Mark E. Gettings en *Science*, vol. 188, n.º 4190, págs. 787-796; 23 de mayo de 1975.

YELLOWSTONE HOT SPOT: CONTEMPORARY TECTONICS AND CRUSTAL PROPERTIES FROM EARTHQUAKE AND AEROMAGNETIC DATA. R. B. Smith, R. T. Shuey, J. R. Pelton y J. P. Bailey en *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, n.º 26, págs. 3665-3676; 10 de septiembre de 1977.

PLANETAS CON ANILLOS

THE PLANET SATURN. F. A. Alexander. Faber and Faber, London; 1962.

THE RINGS OF SATURN. Frank Palluconi y Gordon H. Pettengill. NASA SP-343; 1974.

THE RINGS OF SATURN. James B. Pollack en *Space Science Review*, 18, págs. 3-39; 1975.

THE OUTER PLANETS. D. M. Hunten en *Scientific American*, 233, p. 130; 1975.

AZIMUTHAL BRIGHTNESS VARIATION OF SATURN'S RING A, AND SIZE OF PARTICLES. Ignacio Ferrín en *Nature*, 271, págs. 528-529; 1978.

PHYSICAL STUDIES OF THE PLANETARY RINGS. W. H. Ip. Max-Planck Institute fur Aeronomie, Publication MPAE-W-100-79-02; 1979.

LA PERCEPCION DEL CRECIMIENTO HUMANO

THE FACE OF CHANGE ON CHANGING FACES: IMPLICATIONS FOR A THEORY OF OBJECT PERCEPTION. Robert E. Shaw y John B. Pittenger en *Perceiving, Acting and Knowing*, dirigido por Robert Shaw y J. Bransford. Halsted Press, 1977.

PERCEPTUAL INFORMATION FOR THE AGE-LEVEL OF FACES AS A HIGHER ORDER INVARIANT OF GROWTH. John B. Pittenger, Robert E. Shaw y Leonard S. Mark en *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 5, n.º 3, págs. 478-493; agosto, 1979.

CANGREJOS DECORADORES

ATTACHMENT OF DECORATING MATERIALS IN *LOXORHYNCHUS CRISPATUS*. Mary Katherine Wicksten en *Transactions of the American Microscopical Society*, vol. 97, n.º 2, págs. 217-220; 1978.

DECORATING BEHAVIOR OF *LOXORHYNCHUS CRISPATUS* AND *LOXORHYNCHUS GRANDIS*. Mary Katherine Wicksten en *Crustaceana*, suplemento 5, págs. 37-46; 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

THE FOUR-COLOR PROBLEM. Oystein Ore. Academic Press, 1967.

LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DEL MAPA DE CUATRO COLORES. Kenneth Appel, Wolfgang Haken en *Investigación y Ciencia* n.º 15, págs. 78-91; diciembre, 1977.

TALLER Y LABORATORIO

FLOW VISUALIZATION WITH STEREO SHADOWGRAPHS OF STRATIFIED FLUID. C. W. McCutchen en *The Journal of Experimental Biology*, vol. 65, n.º 1, págs. 11-20; agosto, 1976.

FLUID DYNAMIC PHENOMENA CAN BE DEMONSTRATED WITH STEREO SHADOWGRAPS OF STRATIFIED FLUID. C. W. McCutchen en *American Journal of Physics*, vol. 44, n.º 10, págs. 981-983; octubre, 1976.

FROUDE PROPULSIVE EFFICIENCY OF A SMALL FISH, MEASURED BY WAKE VISUALISATION. C. W. McCutchen en *Scale Effects in Animal Locomotion*, dirigido por T. J. Pedley. Academic Press, 1977.